

**Universidad Politécnica de Madrid  
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica**



**ANÁLISIS DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN  
PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO  
TÉRMICO DE UNA EDIFICACIÓN  
POR RADIACIÓN SOLAR**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**ALBERTO DÍAZ GARCÍA**

MADRID, JUNIO 2011

**Universidad Politécnica de Madrid**  
**Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica**

**Máster Universitario en**  
**Innovación Tecnológica en Edificación**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**ANÁLISIS DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN**  
**PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO**  
**TÉRMICO DE UNA EDIFICACIÓN**  
**POR RADIACIÓN SOLAR**

Autor  
**Alberto Díaz García**

Directora  
**Doña Carmen Viñas Arrebola**

Subdirección de Investigación, Doctorado y Postgrado

Madrid, Junio 2011



## RESUMEN

Aplicando el software informático STAR CCM+ se estudiará el comportamiento térmico por radiación solar de una edificación, para observar su viabilidad y utilidad en fase de proyecto. El modelo que se utilizará, en el análisis del software, será un aula de clase de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid.

El programa de simulación genera una base de datos de flujos de calor, sobre las paredes de la habitación, debida a los procesos de convección, conducción y radiación solar. En la simulación realizada se obtienen diferentes parámetros como la radiación directa en las paredes del aula, el coeficiente de transferencia de calor o la temperatura de las paredes del aula. Se realizarán dos simulaciones, una con la fachada principal orientada al norte (orientación real) y otra orientando la fachada al sur (orientación ficticia). Con los datos obtenidos en las simulaciones se analizará el comportamiento térmico del edificio, y se observarán las carencias que posee, para poder modificar el proyecto antes de su ejecución, mejorando el proyecto final de la edificación con esta herramienta de simulación.



## **ABSTRACT**

Applying the software STAR CCM + will study the thermal behavior for solar radiation of a building, to observe his viability and utility in project phase. The model who will be in use in the analysis of the software will be a classroom of class of the Technical Top School of Architecture belonging to the Technical University of Madrid.

The program of simulation generates a database of heat flows, on the walls of the room, owed to the processes of convection, conduction and solar radiation. In the realized simulation different parameters are obtained as the direct radiation in the walls of the classroom, the coefficient of heat transfer or the temperature of the walls of the classroom. Two simulations will be realized, one with the main face orientated in the northern part (real orientation) and other one orientating the front in the southern part (fictitious orientation). With the information obtained in the simulation the thermal behavior of the building will be analyzed, and will be observed the lacks that it possesses, to be able to modify the project before his execution, improving the final project of the building with this tool of simulation.





## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	0
ABSTRACT .....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO .....	7
3. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS .....	8
4. ESTADO DEL ARTE, FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANTECEDENTES .....	9
5.1. PROCESOS FÍSICOS POR TRANSFERENCIA DE CALOR.....	9
5.1.1. Introducción.....	9
5.1.2. Transferencia de calor por conducción.....	19
5.1.3. Transferencia de calor por convección .....	20
5.1.4. Transferencia de calor por radiación .....	22
5.2. RADIACIÓN SOLAR.....	27
5.2.1. Introducción.....	27
5.2.2. Radiación solar en el planeta tierra .....	27
5.2.3. Leyes de la Radiación.....	29
5.2.4. Radiación solar entrante en la atmósfera.....	30
5.2.5. Radicación terrestre saliente a la atmósfera .....	33
5.2.6. Movimiento aparente del sol .....	35
5.2.7. Coordenadas solares .....	37
5.2.8. Medición de la radiación solar.....	38
5. DESARROLLO DEL TRABAJO.....	40
6.1. ANÁLISIS PROGRAMAS INFORMÁTICOS DE SIMULACIÓN	
VIRTUAL DE DINÁMICA DE FLUIDOS.....	42
6.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE INFORMÁTICO STAR CCM+ .....	46
6.3. APLICACIÓN DEL SOFTWARE A UN MODELO .....	79



6. RESULTADOS Y OPTIMIZACIÓN .....	89
7. CONCLUSIONES.....	99
8. BIBLIOGRAFÍA .....	101

## 1. INTRODUCCIÓN

Los efectos del Sol sobre la tierra son una realidad, desconocida y a menudo subestimada. Por ejemplo, el procedimiento mediante el cual se valoran las necesidades caloríficas de una vivienda, nos da a conocer con el desdén con que se mira principalmente la energía solar. Por lo tanto al diseñar un sistema de calefacción se considera la vivienda como un medio cerrado que no reciba más energía exterior ni interior que la producida intencionadamente. Las aportaciones debidas a: ventanales, muros macizos soleados, luces...

En lugares donde se necesita climatización, la vivienda es también la mayor parte de las veces una caja cerrada, demasiado caliente a causa de la presencia humana y de las infiltraciones. El acondicionador de aire es el único medio pensado para refrescarla. Hay que considerar la importancia del enfriamiento terrestre natural, la utilización de la evaporación del agua sobre la cara exterior del edificio, o la ventilación natural que aprovecha las diferencias de presión entre las distintas fachadas del mismo, medidas de acondicionamiento pasivo que no se utilizan lo suficiente, y a las que no se les da la importancia que se debe, ya que la toma de alguna de estas medidas reduce el consumo energético del edificio en un importante porcentaje sin tener un gasto económico demasiado elevado.

Las medidas de acondicionamiento pasivo son medidas que se toman en los edificios para mejorarlos en el apartado de consumo energético principalmente y que no necesitan para funcionar sistemas mecánicos.

Como consecuencia de la no utilización de las medidas naturales, actualmente nos encontramos en los edificios unas instalaciones de aire acondicionado y calefacción muy importantes, que podrían verse reducidas con la aplicación de alguna de estas medidas.



Existen instrumentos de ayuda al correcto diseño energético de los edificios, que pueden ser utilizados para evaluar el comportamiento interno y externo de los mismos. Una forma de evaluar energéticamente un edificio es mediante los programas de simulación.

Los programas de simulación transitoria permiten, a partir de datos climáticos del emplazamiento y de la descripción de sus elementos constructivos, realizar una simulación horaria de las condiciones exteriores e interiores y estudiar la interacción y repercusión con cada uno de dichos elementos mediante la resolución de diferentes ecuaciones dinámicas de transferencia de calor y de flujos acoplados.

## 2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Los cambios de calor existen y pueden ser utilizados apropiadamente a fin de obtener, un balance térmico favorable, este es el principal motivo de la realización de este estudio.

El estudio que se va a desarrollar tiene como objetivo, facilitar el diseño de edificaciones teniendo en cuenta las condiciones climáticas, aprovechando los recursos disponibles (sol, vegetación, lluvia, vientos) para disminuir los impactos medio ambientales, intentando reducir los consumos de energía y a su vez los costes del usuario.

La utilización de programas de simulación, CFD (Computacional Fluid Dynamics) permite construir modelos en 2D y 3D y predecir la distribución de velocidades, presiones y temperaturas del flujo en el interior de un edificio para casos de ventilación (natural y forzada), calefacción, refrigeración, aire acondicionado y radiación solar.

En consecuencia, con estos programas de simulación se puede predecir con precisión la demanda y el consumo de un edificio cuando todavía está en su fase de proyecto, lo que permite introducir las mejoras necesarias para optimizar su comportamiento térmico. Si es posible con medidas de acondicionamiento pasivo, las cuales apoyarían las instalaciones de aire acondicionado y calefacción, consiguiendo la reducción en su dimensionado, y un ahorro económico.

### 3. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS

El objetivo general del trabajo es estudiar la viabilidad de utilizar un software informático de simulación, para analizar el comportamiento térmico por radiación solar de una edificación en fase de proyecto, y así detectar problemas que pueda tener el proyecto y aplicar soluciones para mejorar la edificación antes de su ejecución, para conseguir una mejora del funcionamiento del edificio energéticamente y un ahorro económico al prever los problemas antes de producirse.

Los objetivos específicos:

- Analizar los diferentes tipos de herramientas de simulación que ofrece el mercado para el estudio del comportamiento térmico por radiación solar de un edificio.
- Seleccionar una herramienta de simulación para el análisis del comportamiento térmico por radiación solar de un edificio.
- Aplicar la herramienta seleccionada en un edificio, para estudiar su comportamiento térmico por radiación solar.
- Realizar dos simulaciones del edificio con orientaciones distintas, para analizar la orientación adecuada.

## **4. ESTADO DEL ARTE, FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANTECEDENTES**

### **5.1. PROCESOS FÍSICOS POR TRANSFERENCIA DE CALOR**

#### **5.1.1. Introducción**

Siempre que existe una diferencia de temperatura en el universo, la energía se transfiere de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. De acuerdo con los conceptos de la termodinámica, esta energía transmitida se denomina calor.

Calor y temperatura son conceptos que en el lenguaje cotidiano se confunden, pero son diferentes. El calor es una energía y la temperatura la medición de esa energía.

La materia está formada por átomos o moléculas que están en constante movimiento, por lo tanto tienen energía de movimiento, llamada energía cinética. Los continuos choques entre los átomos o moléculas transforman parte de la energía cinética en calor, cambiando la temperatura del cuerpo.

- Calor. Se denomina calor a la energía intercambiada entre un sistema y el medio que le rodea, debido a los choques entre las moléculas del sistema y el exterior al mismo. En el Sistema Internacional (SI), el calor se mide en Joule, J. Otra unidad común de energía es la caloría, cal.

- Temperatura. La temperatura es una medida de la energía cinética media de los átomos y moléculas individuales de una sustancia. La temperatura se mide en grados Celsius, C, o en el sistema internacional (SI) en Kelvin, K.

La temperatura es una magnitud física que se refiere a la sensación de frío o caliente al tocar alguna sustancia. En cambio el calor es una transferencia de energía de una parte a otra de un cuerpo, o entre diferentes cuerpos, producida por una diferencia de temperatura. El calor es energía en tránsito; siempre fluye de una zona de mayor temperatura a otra de menor temperatura, con lo que eleva la temperatura de la zona mas fría y reduce la de la zona más cálida, siempre que el volumen de los cuerpos se mantenga constante. La energía no fluye desde un objeto de temperatura baja a otro de temperatura alta si no se realiza trabajo.

Las leyes de la termodinámica en el campo de la transferencia de energía, siempre se refieren a sistemas que están en equilibrio, y solo pueden utilizarse para predecir la cantidad de energía requerida para cambiar un sistema de un estado de equilibrio a otro, por lo que no sirven para predecir la rapidez con que puedan producirse estos cambios de estado.

La transferencia de calor complementa los principios primero y segundo de la termodinámica clásica, proporcionando los métodos de análisis que pueden utilizarse para predecir la velocidad de la transmisión del calor, además de los parámetros variables durante el proceso en función del tiempo.

Para un análisis completo de la transferencia del calor es necesario considerar los tres mecanismos fundamentales de transmisión: conducción, convección y radiación, y además del mecanismo de acumulación. El análisis de los sistemas y modelos de intercambio de calor requieren familiaridad con cada uno de estos mecanismos y sus fundamentos, así como de sus interacciones.

En este primer apartado se definen brevemente los principios básicos de la transmisión del calor como avance. Se seguirá el guión siguiente:

- Conducción
- Convección
- Radiación



- Mecanismos combinados de transmisión de calor
- Resistencia térmica
- Dimensiones y unidades físicas

### Conducción

La conducción es el modo de transferencia térmica en el que el calor se mueve desde una capa de temperatura elevada del cerramiento a otra capa de inferior temperatura debido al contacto directo de las moléculas del material.

La conducción térmica está determinada por la ley de Fourier. La cual establece que la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada, es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección.

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Siendo:

$\frac{dQ}{dt}$ : Tasa de Flujo de Calor que atraviesa el área A en una dirección x (J/s)

$\lambda$ : Coeficiente conductividad térmica (W/m °K)

T: Temperatura (°K)

t: Tiempo (s)

Si el cerramiento se encuentra en equilibrio termodinámico resulta que el flujo de calor y la temperatura en cada punto del mismo permanece constante, y el proceso se denomina transmisión en régimen estacionario, y el flujo de calor es función de la propiedad de los materiales denominada conductividad.

Cuando no existe el anterior equilibrio, ya sea porque el cerramiento no ha tenido tiempo para estabilizarse o debido a que las condiciones del entorno

varían en el tiempo, el proceso se denomina transmisión en régimen transitorio, caracterizado porque la temperatura en cada punto del cerramiento varían en el tiempo. Una consecuencia de la variación de temperatura en el interior del cerramiento es la acumulación del calor, debido a la propiedad de los materiales de absorber o disipar energía cuando varía su temperatura denominada calor específico

### Convección

Cuando el aire de un ambiente se pone en contacto con la superficie de un cerramiento a una temperatura distinta, el proceso resultante de intercambio de calor se denomina transmisión de calor por convección. Este proceso es una experiencia común, pero una descripción detallada del mecanismo es complicada dado que además de la conducción hay que considerar el movimiento del aire en zonas próximas a la superficie.

Existen tres casos de transferencia de calor por convección:

- En el caso que la fuerza motriz que mueve el aire proceda exclusivamente de la diferencia de densidad en el aire que resulta del contacto con la superficie a diferente temperatura y que da lugar a fuerzas ascensionales se producirá el proceso de transmisión denominado convección libre o natural.
- Cuando exista una fuerza motriz exterior, como el viento, que mueva al aire sobre una superficie a diferente temperatura se producirá una convección forzada, que debido al incremento de la velocidad del aire se transmitirá una mayor cantidad de calor que en la convección libre para una determinada diferencia de temperatura.
- En el caso que se superpongan ambas fuerzas motrices, por ser de magnitudes semejantes, el proceso se denomina convección mixta.

En cualquiera de los casos anteriores el fenómeno se puede evaluar mediante la Ley del enfriamiento de Newton, la cual relaciona la velocidad de transferencia de calor por convección con el coeficiente de película, el área de la superficie, la temperatura de la superficie y la temperatura del fluido.

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot A_s (T_s - T_{inf}) \quad (2)$$

Siendo:

$\frac{dQ}{dt}$  : Tasa de Flujo de Calor (J/s)

$A_s$ : Área del cuerpo en contacto con el fluido

$h$ : Coeficiente de convección (W/m °K)

$T_s$ : Temperatura en la superficie del cuerpo (°K)

$T_{inf}$ : Temperatura del fluido (°K)

$t$ : Tiempo (s)

### Radiación

Se denomina transmisión de calor por radiación cuando la superficie del cerramiento intercambia calor con el entorno mediante la absorción y emisión de energía por ondas electromagnéticas. Mientras que en la conducción y la convección era precisa la existencia de un medio material para transportar la energía, en la radiación el calor se transmite a través del vacío, o atravesando un medio transparente como el aire.

Todas las superficies opacas emiten energía en forma de radiación en una magnitud proporcional a la cuarta potencia su temperatura absoluta  $T$ , y en un rango de longitudes de onda inversamente proporcional a su temperatura absoluta. Por consiguiente, los cerramientos emiten radiaciones de onda larga, correspondiente al espectro infrarrojo lejano, procedente de sus superficies a temperaturas típicas del ambiente, en función de una propiedad superficial

denominada emisividad, y de forma simultánea absorben radiaciones similares emitidas por las superficies visibles de su entorno, en un proceso denominado irradiación.

El fenómeno se puede evaluar mediante la Ley de Stefan-Boltzmann, el cual relaciona la velocidad de transmisión de la energía por unidad de superficie radiante de un cuerpo negro con la temperatura absoluta del cuerpo y una constante física del cuerpo  $\sigma$ .

$$\frac{dQ}{dt} = \sigma \cdot T^4 \quad (3)$$

Siendo:

$\frac{dQ}{dt}$ : Tasa de Flujo de Calor (J/s)

$\sigma$ : Cte de Stefan-Boltzmann=  $5,67 \times 10^{-8}$  (W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

T: Temperatura absoluta (°K)

Sin embargo, la mayor parte de los cuerpos de interés en ingeniería no se comportan como cuerpos negros y son considerados cuerpos grises. Estos emiten una energía radiante por unidad de tiempo.

$$\frac{dQ}{dt} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4)$$

Siendo:

$\frac{dQ}{dt}$ : Tasa de Flujo de Calor (J/s)

$\varepsilon$ : Emisividad (Adimensional)

$\sigma$ : Cte de Stefan-Boltzmann=  $5,67 \times 10^{-8}$  (W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

T: Temperatura absoluta (°K)

En el ambiente también se puede considerar la presencia de radiaciones de onda corta, correspondiente al espectro de radiación visible e infrarrojo

cercano, procedente de fuentes de elevada temperatura como el sol y el alumbrado artificial, para las cuales los cerramientos se comportan sólo como absorbentes, en función de una propiedad superficial denominada absorción.

### Mecanismos combinados de transmisión del calor

Los procesos de transmisión del calor por medio de la conducción, convección y radiación, junto con la eventual acumulación, se producen de forma simultánea y concurrente, de manera que en situaciones reales, e incluso en condiciones de laboratorio, es difícil discernir con exactitud la contribución de cada mecanismo en la transmisión de calor entre los ambientes y el cerramiento.

En el intercambio de calor entre la superficie del cerramiento y el ambiente se solapan los flujos debidos a la radiación y la convección, debiéndose considerar en el primero la contribución de la absorción de onda corta, ya sea procedente del sol o del alumbrado, y la de onda larga, procedentes de las superficies del entorno e incluso, en el caso de recintos cerrados, existirían radiaciones infrarrojas emitidas por el cerramiento y reflejadas por el resto de los paramentos.

Simultáneamente a la radiación, los flujos de calor por convección dependerán si el aire es movido por fuerzas gravitatorias o son impulsados por agentes externos, o por una combinación de ambos.

En la transmisión de calor por conducción a través de los cerramientos hay que considerar generalmente que éste está constituido por varias capas con propiedades físicas diferentes, debiéndose calcular su resistencia térmica total como la suma de varias resistencias en serie, y que las temperaturas interiores resultantes en régimen estacionario tendrán un gradiente diferente en cada capa. En el caso de existir zonas adyacentes con diferentes conductividades,

tales como puentes térmicos, el coeficiente global de conductividad será la media ponderada de las conductividades en paralelo.

En la figura 1 se observa un esquema general de los flujos de calor entre el cerramiento y su entorno.

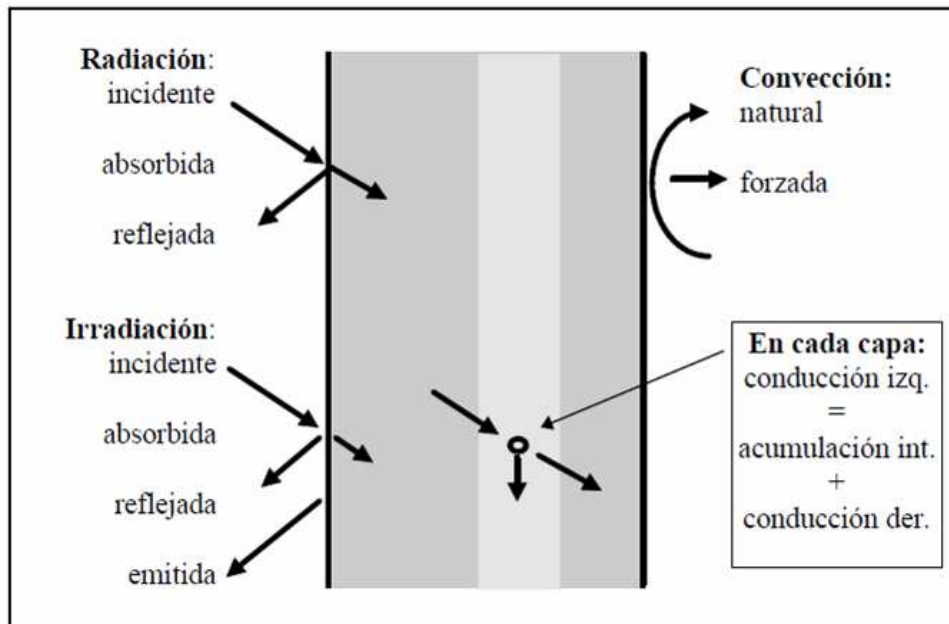


Figura 1. Esquemas de los flujos de calor entre el cerramiento y su entorno

Un caso particular sería la presencia de cámaras de aire en el interior del cerramiento, en las cuales se generan mecanismos de transmisión de calor por convección y radiación, que generalmente se pueden asimilar a una capa con resistencia térmica pero sin acumulación de calor por carecer de masa apreciable.

### Resistencia térmica

Se define como la oposición que presenta un cuerpo al paso del flujo calorífico. Este concepto es muy utilizado a la hora de calcular las pérdidas caloríficas que se producen en una edificación, así en las pérdidas por conducción la resistencia térmica “R” que presenta una pared plana homogénea: con un coeficiente de conductividad térmica  $\lambda$  y un espesor “e”.

$$CR = \frac{e}{\lambda} \quad (5)$$

Siendo:

R: Resistencia térmica ( $\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ )

$\lambda$ : Coeficiente de conductividad ( $\text{W/m } ^\circ\text{K}$ )

e: Espesor de la pared (m)

Del mismo modo se puede aplicar el concepto de resistencia térmica “R” a las pérdidas por convección:

$$R' = \frac{1}{h} \quad (6)$$

Siendo:

R': Resistencia térmica ( $\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ )

h: Coeficiente de convección ( $\text{W/m } ^\circ\text{K}$ )

La resistencia térmica total, cuando sobre una pared plana se produzcan pérdidas por convección y conducción, será la suma de las resistencias anteriores:  $R+R'$

### Dimensiones y unidades físicas

Una dimensión es el nombre dado a cualquier magnitud que se puede medir. Por ejemplo, el espacio ocupado por un objeto se califica por la dimensión llamada volumen. La distancia entre dos puntos se califica por la dimensión llamada longitud. Las dimensiones comunes utilizadas en un curso de transmisión del calor son la longitud, el tiempo, la masa, el calor y la temperatura.

Para poder realizar cálculos numéricos, cada dimensión debe cuantificarse mediante una unidad definida y reproducible. Las unidades son los nombres arbitrarios que especifican la magnitud de cada dimensión. Por ejemplo, el metro es una unidad para la dimensión de longitud. Otras unidades de longitud usadas para cuantificar esta dimensión son el pie, la yarda, la milla, el milímetro, el centímetro y el kilómetro.

Actualmente existen en todo el mundo varios sistemas de unidades diferentes. El sistema SI (Sistema Internacional) ha sido adoptado por la International Organization for Standardization y recomendado por un gran número de organizaciones nacionales de metrología. Por estas razones se utilizarán las unidades SI en todo este estudio. Las unidades asignadas al sistema SI y a otros sistemas comúnmente utilizados se resumen en la tabla 1.

Dimensión	SI	MKS	CGS	EEUU
Longitud	m	m	cm	pie
Tiempo	s	s	s	s
Masa	Kg	UTM	g	lbm
Temperatura	°K	°C	°C	°F
Calor	Julio	kcal	cal	Btu

*Tabla 1. Unidades básicas y derivadas en varios sistemas*

En la formulación de ecuaciones suelen aparecer implicadas magnitudes físicas que se derivan de las dimensiones primarias, de manera que las operaciones aritméticas de las magnitudes físicas de los elementos deben ser



compatibles con la magnitud física del resultado. Para evitar errores se debe verificar que las operaciones matemáticas de sus magnitudes, expresadas en las dimensiones primarias sean coherentes, cada ecuación esta descrita con su símbolo y unidad de medida correspondiente.

### 5.1.2. Transferencia de calor por conducción

La conducción es el único mecanismo de transmisión del calor posible en los medios sólidos opacos, tales como el interior de los cerramientos. Cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura debido al contacto directo entre las moléculas del medio.

La conducción pura tiene lugar fundamentalmente en los sólidos opacos, en donde el movimiento de masa se encuentra impedido. En el ámbito del presente estudio se puede aplicar plenamente la conducción pura al interior de los cerramientos, pero los principios que se desarrollarán pueden aplicarse asimismo a gases que tengan limitado el movimiento convectivo, como es el casos de los aislamientos en los cuales predomina el volumen ocupado por el gas, ya este se encuentra confinado por una estructura fibrosa o celular.

El caso mas sencillo de conducción es el que se establece en sólidos de caras paralelas de manera que el flujo será unidireccional, cuando dicho sólido se encuentre en equilibrio termodinámico sin variar su temperatura en el tiempo, lo que se denomina régimen estacionario y que implica que no existe acumulación de calor, y que además no existan fuentes o sumideros de calor en su seno, es decir, sin generación de calor. El calor transmitido por conducción por unidad de tiempo y por unidad de superficie, es decir, el flujo de calor  $\frac{dQ}{dt}$ , es proporcional al gradiente de temperatura  $dT/dx$ , siendo  $x$  la dirección del flujo y el área normal a éste. El coeficiente de proporcionalidad del

flujo de calor es una propiedad física del medio, denominada conductividad térmica  $\lambda$ , de manera que:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (7)$$

Siendo:

$\frac{dQ}{dt}$  : Flujo de Calor (J/s)

A: Área (m<sup>2</sup>)

$\lambda$ : Coeficiente conductividad térmica (W/m °K)

T: Temperatura (°K)

Esta ecuación expresa la Ley de conducción de Fourier, donde el signo negativo indica que para existir un flujo de calor de dirección positiva se precisa un gradiente de temperatura negativo en dicha dirección, es decir, que la temperatura disminuye en dicha dirección.

La conductividad térmica  $\lambda$  es una propiedad física de cada sustancia, y puede variar ligeramente en función de la temperatura y de las características particulares del material, como puede ser el contenido de humedad de los materiales constructivos. En los casos que el material no sea homogéneo, como las fábricas de ladrillo, o que su estructura sea anisótropa, como es el caso de la madera, será preciso determinar la conductividad para la dirección del flujo considerado.

### 5.1.3. Transferencia de calor por convección

Cuando una superficie se pone en contacto con un fluido a distinta temperatura se produce, en los primeros instantes, una transmisión de calor por conducción, pero una vez que el fluido en contacto con la superficie modifica su temperatura sufre una diferencia de densidad respecto al resto del fluido, que hace que sea desplazado por éste al actuar las fuerzas gravitatorias, lo que incrementa la

transferencia del calor en una magnitud muy superior al de la mera conducción. Este fenómeno se denomina convección libre o natural, que es la que se suele considerar en ambientes interiores, ya que se estima que el aire permanece prácticamente en reposo.

Otro caso es aquel en que el aire se mueve fundamentalmente debido a fuerzas exteriores, tales como el viento, en cuyo caso el proceso de transferencia de calor se incrementa notablemente y se denomina convección forzada, que es el que habitualmente se considera en superficies en contacto con el ambiente exterior.

Existe un tercer caso, intermedio entre los anteriores, en que las fuerzas actuantes, debidas a la variación de la densidad y las acciones exteriores (viento), son de magnitud parecida, produciéndose una superposición de los efectos de la convección libre y la forzada, y que se denomina convección mixta. Es el caso mas general porque en la práctica siempre hay variación de densidad y además el aire no está en reposo absoluto.

Se define el coeficiente superficial de transmisión de calor  $h$ , también llamada coeficiente de película o conductancia superficial, como el parámetro que relaciona el flujo de calor  $\frac{dQ}{dt}$  entre una superficie y el ambiente como función lineal de la diferencia de temperatura superficie-aire, tal como es utilizado en la Ley de enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (8)$$

Siendo:

$\frac{dQ}{dt}$  : Flujo de Calor (J/s)

A: Superficie de contacto ( $m^2$ )

h: Coeficiente convección térmica ( $cal/s.cm^2 \text{ } ^\circ C$ )

T: Temperatura ( $^{\circ}K$ )

Los parámetros fundamentales que se utilizan para el cálculo simplificado del valor del coeficiente  $h$  son la dirección del flujo de calor y la velocidad del aire, este último factor referido únicamente a ambientes interiores con el aire casi en reposo y ambientes exteriores con viento con una velocidad de proyecto típica de invierno, la cual se suele considerar en torno a 3 m/s (12 Km/h). No se consideran otros factores que influyen en el proceso físico de transmisión de calor como la rugosidad de la superficie, la magnitud del salto térmico, el tamaño de la superficie, la velocidad exacta del aire y la emisividad de la superficie, por tratarse de un cálculo aproximado.

#### 5.1.4. Transferencia de calor por radiación

La transmisión de calor por radiación se caracteriza porque la energía se transporta de una superficie a otra en forma de ondas electromagnéticas, que se propagan en línea recta a la velocidad de la luz y no requieren de un medio físico para transmitirse.

Tanto la teoría ondulatoria como la corpuscular son útiles para explicar el comportamiento de la radiación térmica. La teoría ondulatoria asimila la radiación a una onda que oscila con una frecuencia  $\nu$ , y a una longitud de onda  $\lambda$ .

$$c = \lambda \cdot \nu = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (9)$$

Siendo:

$c$ : Velocidad de la luz (m/s)

$\lambda$ : Longitud de onda (m)

$\nu$ : Frecuencia ( $\text{s}^{-1}$ )

La teoría corpuscular admite que la energía radiante se transporta en forma de paquetes llamados fotones, que se propagan con distintos niveles energéticos  $E$  dados por:

$$E = h \cdot \nu \quad (10)$$

Siendo:

E: Energía radiante (J)

h: Constante de Planck (6,6256 J.s)

u: Frecuencia ( $s^{-1}$ )

Cuando un cuerpo toma energía los electrones libres son excitados, saltando a niveles de mayor energía, y cuando retornan al nivel de equilibrio devuelven dicha diferencia de energía en forma de un fotón. En toda superficie existen continuamente electrones que cambian de diferentes niveles, por lo que la energía radiante se emite en un abanico de frecuencias llamado espectro de la radiación. Cuando el origen de la radiación es el calor, la energía se emite en función solo de la temperatura y se denomina radiación térmica.

### Características radiantes de los materiales

Los materiales reales intercambian radiación térmica con su entorno en función de las características de su superficie entre otros parámetros. En términos generales hay que distinguir dos aspectos del fenómeno, ya que la superficie es al mismo tiempo emisora y receptora de radiación térmica.

En el primer caso, la energía que emite una superficie depende de la temperatura absoluta  $T$  de la superficie y de la emitancia  $\varepsilon$ , que es la razón entre la energía  $Q_e$  emitida por la superficie y la energía  $Q_0$  que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura. Puede definirse como la cantidad térmica radiada por unidad de superficie de un cuerpo excitado térmicamente por unidad de tiempo, depende exclusivamente de la temperatura absoluta de dicho cuerpo, de la sustancia de la que está constituido y de la naturaleza de la superficie.

$$\varepsilon = Q_e / Q_0 \quad (11)$$

Siendo:

$\varepsilon$ : Emitancia ( $W/m^2$ )

$Q_e$ : Energía emitida por la superficie ( $W/m^2$ )

$Q_0$ : Energía que emite un cuerpo negro ( $W/m^2$ )

En el caso que una superficie sea receptora de una radiación térmica incidente  $Q_i$ , parte de la energía será reflejada, otra será absorbida y el resto será transmitida. Los coeficientes de dichas fracciones se denominan respectivamente reflectancia  $\rho$ , absorptancia  $\alpha$  y transmitancia  $\tau$  verificándose la siguiente ecuación

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (12)$$

En el caso que la superficie sea opaca, como es el caso de los cerramientos de edificios, ninguna energía será transmitida, por lo que:

$$\tau = 0 \quad \rho + \alpha = 1 \quad (13)$$

Se denominan propiedades radiantes de las superficies las relaciones constantes e intrínsecas que describen cuantitativamente la forma en que la energía radiante interacciona con la superficie de los materiales. Se clasifican en propiedades espectrales si describen el comportamiento de las superficies en función de la longitud de onda y propiedades direccionales si dependen de la inclinación de la radiación respecto a la superficie.

### Cuerpo negro

No todas las superficies emiten o absorben la misma cantidad de energía radiante cuando se calientan a la misma temperatura. Un cuerpo que absorba o emita a una temperatura determinada la máxima cantidad de energía se denomina superficie negra o simplemente cuerpo negro. El cuerpo negro es un cuerpo imaginario que se supone con capacidad para absorber toda la radiación térmica incidente; es decir, aquel en el que se cumple:

$$\alpha = 1 \quad \rho = 0 \quad (14)$$

Este es el cuerpo absolutamente negro, un absorbente perfecto de la radiación. Se llaman "negros" porque las superficies pintadas de negro suelen presentar poderes absorbentes muy altos. En la práctica se puede acercarse bastante a las propiedades de una superficie negra perfecta empleando un cuerpo negro, esférico, ennegrecido en su superficie interior con una sustancia que sea muy absorbente para la radiación térmica (por ejemplo, negro de humo). Si se practica un pequeño orificio, la radiación que en él penetra se absorberá en parte y se reflejará la restante. La fracción reflejada incidirá sobre otra zona de la superficie interna y también se absorberá y reflejará en parte, y así sucesivamente. Por consiguiente, nada o prácticamente nada, de la radiación incidente se escapará por el orificio por el que penetró, por lo que el plano del orificio se comporta como un cuerpo negro perfecto con respecto a la radiación que incide sobre él.

### Cuerpo gris

Cuando una superficie conserva constantes sus propiedades cromáticas en todo el espectro se denomina superficie gris. Este es un concepto teórico, pero que se puede aplicar con resultados suficientemente exactos para superficies con propiedades relativamente uniformes.

Se llama cuerpo gris o emisor gris a un tipo especial de superficie no negra en el que el poder emisor monocromático es independiente de la longitud de onda de la radiación emitida, en el que la emisión del cuerpo gris en función de la longitud de onda y la emisión del cuerpo negro dan el mismo coeficiente para todas las longitudes de onda de las radiaciones emitidas a la misma temperatura. Esta definición de cuerpo gris no elimina la posibilidad de que el poder emisor dependa de la temperatura de la superficie emisora. Las características de superficie gris la poseen en grado bastante elevado ciertos materiales, como la pizarra, etc.

Además, si se emplea el valor medio del poder emisor tomado a lo largo de toda la banda de longitudes de onda es posible representar una superficie no gris como si lo fuera.

El suponer que el poder es independiente de la longitud de onda de la emisión, determina que la curva de distribución de la emitancia monocromática para un cuerpo gris pueda ajustarse a la de una superficie absolutamente negra a la misma temperatura, sin que se registre un desplazamiento del máximo de la curva.

### Cuerpo real

Los cuerpos reales son los que tienen unos niveles de distribución de energía complejos, habitualmente la radiación no está distribuida como la del cuerpo negro, ya sea, con respecto a la longitud de onda o con la dirección de la emisión. Sin embargo, por razón de sencillez, se emplea a veces el cuerpo negro como un patrón para representar en relación con él, las propiedades generales de un cuerpo. De esta forma se puede asignar al cuerpo una emisividad global, de forma que a la temperatura, emita una fracción de la energía emitida por el cuerpo negro a esa temperatura.

Se asigna a un cuerpo las propiedades de reflexión, de absorción, y transmisión, en tal forma que si una radiación de intensidad incide sobre él, las proporciones en que se refleja la energía, en que se absorbe y transmite, varían entre cero y uno para los cuerpos reales. Estas propiedades de radiación, varían mucho según los cuerpos y, lo que es más importante, varían con la longitud de onda de la radiación para un cuerpo dado. Esta dependencia de la longitud de onda, es por supuesto debida al carácter del proceso absorción-emisión. Esto se puede representar muy bien expresando las propiedades en términos de la temperatura del cuerpo (para la temperatura de la fuente de la radiación incidente, y por lo tanto de su longitud de onda para las otras propiedades).



## **5.2. RADIACIÓN SOLAR**

### **5.2.1. Introducción**

El sol es la principal fuente de energía para todos los procesos en el sistema tierra -atmósfera - océano, más del 99.9 % de la energía que este sistema recibe proviene del Sol. La superficie de la Tierra, suelos y océanos, y también la atmósfera, absorbe energía solar y la reirradia en forma de calor en todas direcciones.

Para el realizar un estudio del comportamiento térmico de un modelo es necesario estudio integral de la transmisión de calor por radiación entre el cerramiento y el entorno que lo rodea, tanto al interior como al exterior del edificio. Este estudio hay que extenderlo además tanto a la radiación de onda corta (espectro visible e infrarrojo cercano) como de onda larga (infrarrojo lejano), contabilizando la radiación recibida y la emitida.

### **5.2.2. Radiación solar en el planeta tierra**

El sol emite energía en forma de radiación electromagnética. Estas radiaciones se distinguen por sus diferentes longitudes de onda. Algunas, como las ondas de radio, llegan a tener longitudes de onda de kilómetros, mientras que las más energéticas, como los rayos X o las radiaciones gamma tienen longitudes de onda de milésimas de nanómetro.

La energía que llega al exterior de la atmósfera lo hace en una cantidad fija, llamada constante solar. Esta energía es una mezcla de radiaciones de longitudes de onda entre 200 y 4000 nm, que se distingue entre radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja.

### Radiación ultravioleta

Es la radiación ultravioleta de menor longitud de onda (360 nm), lleva mucha energía e interfiere con los enlaces moleculares. Especialmente las de menos de 300 nm que pueden alterar las moléculas de ADN, muy importantes para la vida. Estas ondas son absorbidas por la parte alta de la atmósfera, especialmente por la capa de ozono. Es importante protegerse de este tipo de radiación ya que por su acción sobre el ADN está asociada con el cáncer de piel. Sólo las nubes tipo cúmulos de gran desarrollo vertical atenúan éstas radiaciones prácticamente a cero. El resto de las formaciones tales como cirrus, estratos y cúmulos de poco desarrollo vertical no las atenúan, por lo cual es importante la protección aún en días nublados. Es importante tener especial cuidado cuando se desarrollan nubes cúmulos, ya que éstas pueden llegar a actuar como espejos y difusores e incrementar las intensidades de los rayos ultravioleta y por consiguiente el riesgo solar. Algunas nubes tenues pueden tener el efecto de lupa.

### Luz visible

La radiación correspondiente a la zona visible cuya longitud de onda está entre 360 nm (violeta) y 760 nm (rojo), por la energía que lleva, tiene gran influencia en los seres vivos. La luz visible atraviesa con bastante eficacia la atmósfera limpia, pero cuando hay nubes o masas de polvo parte de ella es absorbida o reflejada.

### Radiación infrarroja

La radiación infrarroja de más de 760 nm, es la que corresponde a longitudes de onda más largas y lleva poca energía asociada. Su efecto aumenta la agitación de las moléculas, provocando el aumento de la temperatura. El dióxido de carbono, el vapor de agua y las pequeñas gotas de agua que forman las nubes absorben con mucha intensidad las radiaciones infrarrojas.

La atmósfera se desempeña como un filtro ya que mediante sus diferentes capas distribuyen la energía solar para que a la superficie terrestre sólo llegue una pequeña parte de esa energía. La parte externa de la atmósfera absorbe parte de las radiaciones reflejando el resto directamente al espacio exterior, mientras que otras pasarán a la Tierra y luego serán irradiadas. Esto produce el denominado balance térmico, cuyo resultado es el ciclo del equilibrio radiante.

Según el tipo de radiación se conoce que de los  $324 \text{ W/m}^2$  que llegan a la Tierra, en la parte alta de la atmósfera ( $1400 \text{ W/m}^2$  es la constante solar);  $236 \text{ W/m}^2$  son reemitidos al espacio en forma de radiación infrarroja,  $86 \text{ W/m}^2$  son reflejados por las nubes y  $20 \text{ W/m}^2$  son reflejados por el suelo en forma de radiaciones de onda corta. Pero el reenvío de energía no se hace directamente, sino que parte de la energía reemitida es absorbida por la atmósfera y devuelta a la superficie, originándose el "efecto invernadero".

### 5.2.3. Leyes de la Radiación

Para entender mejor como la energía radiante del sol interactúa con la atmósfera de la Tierra y su superficie, se deben conocer las leyes básicas de radiación. Son las siguientes:

1. Todos los objetos emiten energía radiante, cualquiera sea su temperatura, por ejemplo el sol, la Tierra, la atmósfera, los polos, las personas, etc.
2. Los objetos con mayor temperatura radian más energía total por unidad de área que los objetos más fríos. Por ejemplo el sol con una temperatura media de  $6000 \text{ K}$  en su superficie, emite  $1.6 \times 10^5 (6000/300)^4$  veces más energía que la Tierra con una temperatura media en superficie de  $290 \text{ K} = 17^\circ \text{ C}$ .
3. Los cuerpos con mayor temperatura emiten un máximo de radiación en longitudes de ondas,  $\lambda$ , más cortas. Por ejemplo el máximo de energía radiante

del sol se produce para longitudes de onda  $\lambda \sim 0.5 \mu\text{m}$ , para la Tierra en  $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$ .

4. Los objetos que son buenos absorbedores de radiación son también buenos emisores.

Este es un principio importante para comprender el calentamiento en la atmósfera, porque sus gases son absorbedores y emisores selectivos en longitud de onda. Así, la atmósfera es aproximadamente transparente (no absorbe) a ciertas longitudes de onda de radiación y aproximadamente opaca (buen absorbedor) en otras longitudes de onda.

#### **5.2.4. Radiación solar entrante en la atmósfera**

La radiación solar que llega al sistema tierra - atmósfera, se conoce también con el nombre de radiación de onda corta, por los valores de longitud de onda en los que se concentra el máximo de emisión de energía solar. La atmósfera es su mayor parte transparente a la radiación solar entrante. Considerando que al tope de la atmósfera llega un 100 % de radiación solar, sólo un 25% llega directamente a la superficie de la Tierra y un 26% es dispersado por la atmósfera como radiación difusa hacia la superficie, esto hace que un 51 % de radiación llegue a la superficie terrestre. Un 19 % es absorbido por las nubes y gases atmosféricos. El otro 30 % se pierde hacia el espacio, de esto la atmósfera dispersa un 6 %, las nubes reflejan un 20 % y el suelo refleja el otro 4 %.

La radiación solar que llega a la atmósfera puede ser dispersada, reflejada o absorbida por sus componentes. Esto depende de la longitud de onda de la energía transmitida y del tamaño y naturaleza de la sustancia que modifica la radiación.

## Dispersión

La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama dispersión. Esto explica como un área con sombra o pieza sin luz solar esta iluminada, le llega luz difusa o radiación difusa. El 26% de radiación difusa desde la atmósfera llega a la tierra.

Los gases de la atmósfera dispersan más efectivamente las longitudes de onda más cortas (violeta y azul) que en longitudes de onda más largas (naranja y rojo). Esto explica el color azul del cielo y los colores rojo y naranja del amanecer y atardecer, como se ve en la figura 2. Cuando amanece o anochece, la radiación solar recorre un mayor espesor de atmósfera y la luz azul y violeta es dispersada hacia el espacio exterior, pasando mayor cantidad de luz roja y naranja hacia la Tierra, lo que da el color del cielo a esas horas.



*Figura 2. Color del cielo al anochecer.*

Las partículas más grandes asociadas con niebla, smog o bruma también dispersan luz en longitudes de onda tal que el cielo se ve del blanco al gris. La dispersión de la luz solar por gotas de agua, bruma o partículas de polvo hacen posible observar bandas de luz solar llamadas rayos crepusculares, que se ven

por ejemplo cuando la luz solar cruza los claros entre las nubes, como se puede apreciar en la figura 3.



*Figura 3. Rayos crepusculares.*

En resumen el color del cielo da una idea del número y tamaño de las partículas en la atmósfera: partículas pequeñas producen atardeceres rojizos, partículas grandes cielo blanco, con aire claro el cielo se ve azul - celeste.

### Reflexión

Aproximadamente el 30 % de la energía solar que llega al tope de la atmósfera es reflejada al espacio, con un 20% reflejado por las nubes, 6% desde la atmósfera y un 4% desde la superficie de la tierra. Esta energía se pierde y no interviene en el calentamiento de la atmósfera. La fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie, se llama albedo, por lo tanto el albedo planetario es en promedio de un 30 %.

El albedo es variable de un lugar a otro y de un instante a otro, depende de la cobertura nubosa, naturaleza de la superficie, inclinación de los rayos solares, partículas en el aire, etc. Las nubes contribuyen con un alto porcentaje de albedo (~ 20 %), se nota en las noches apuntando con una linterna a la niebla como esta brilla. La Luna tiene sólo un 7 % de albedo, porque no tiene atmósfera y en las noches de luna llena da un buen brillo, pero la Tierra brilla aún más sobre la noche lunar, por lo que en la luna las noches de tierra llena son mas claras que en la Tierra las noches de luna llena.

## Absorción

Los gases de la atmósfera son absorbedores selectivos de radiación solar, es decir que absorben gran cantidad para algunas longitudes de onda, moderadas en otras y muy poca en otras. Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno que produce un aumento de temperatura. Los gases que son buenos absorbedores de radiación solar son importantes en el calentamiento de la atmósfera.

Por ejemplo se observa que el nitrógeno es mal absorbedor de radiación solar, el oxígeno y el ozono son buenos absorbedores de radiación. El vapor de agua es buen absorbedor en longitudes de onda mas larga. Para la atmósfera total ningún gas es un efectivo absorbedor de radiación en longitudes de onda entre 0.3 y 0.7  $\mu\text{m}$ , por lo que se tiene un vacío en la región de luz visible, que corresponde a una gran fracción de la radiación solar. Esto explica porque la radiación visible llega a la Tierra y se dice que la atmósfera es transparente a la radiación solar entrante.

### **5.2.5. Radiación terrestre saliente a la atmósfera**

La energía solar directa no es un efectivo calentador de la atmósfera, sino que, es calentada por contra radiación desde la Tierra, generando la dinámica de la máquina del tiempo.

Aproximadamente el 50% de la energía solar que alcanza el tope de la atmósfera, llega a la superficie de la Tierra directa o indirectamente y es absorbida en el suelo. La mayor parte de esta energía es reirradiada hacia el cielo. Pero como la Tierra tiene una temperatura mucho menor que la del sol, la radiación terrestre es emitida en longitudes de onda mucho más larga que la radiación solar de onda corta. La radiación terrestre se emite en longitudes de onda comprendida entre 1 y 30  $\mu\text{m}$ , dentro del rango infrarrojo del espectro, con un máximo en 10  $\mu\text{m}$ , por esta razón se llama también radiación de onda larga o radiación infrarroja.

Algunos gases de la atmósfera pueden absorber parte de la radiación que la Tierra emite al espacio, evitando que esta se pierda hacia el espacio exterior. El vapor de agua absorbe aproximadamente cinco veces más radiación terrestre que todos los otros gases combinados, contribuyendo a elevar la temperatura de la baja troposfera, lugar donde se desarrolla la vida.

Como conclusión, la atmósfera es transparente a la radiación de onda corta del sol, pero absorbe la radiación terrestre de onda larga, por lo tanto la atmósfera no es calentada por la radiación solar, sino que se calienta desde el suelo hacia arriba. Mientras más lejos se está del radiador (la superficie de la Tierra), es mas fría, esto explica la disminución de la temperatura con la altura en la troposfera, que en promedio es de  $-6.5^{\circ}\text{ C/km}$ , conocido como el gradiente normal de temperatura.

### Efecto invernadero natural

La temperatura media de la atmósfera es del orden de  $-20^{\circ}\text{ C}$ . La Tierra tiene una temperatura media del orden de  $17^{\circ}\text{ C}$ . Esta mayor temperatura de la Tierra se debe a que la atmósfera absorbe radiación terrestre y se calienta, reirradia energía, que es reabsorbida por los gases de la atmósfera, que nuevamente la emiten hacia la tierra donde es absorbida por la superficie. Así la superficie de la Tierra esta continuamente recibiendo energía desde la atmósfera y del sol. Este proceso repetitivo hace que la temperatura media de la Tierra sea aproximadamente  $35^{\circ}\text{ C}$  mayor que si no tuviera atmósfera: es el efecto invernadero natural. Se llama así por su similitud con los invernaderos agrícolas: el vidrio de un invernadero deja entrar la radiación de onda corta del sol que calienta los objetos adentro, estos a su vez emiten radiación en onda larga a la cual el vidrio es opaco y el calor queda atrapado en el invernadero. La luna sin atmósfera y casi a la misma distancia del sol que la tierra, tiene una temperatura media  $35^{\circ}\text{ C}$  menor que la Tierra, porque no tiene efecto invernadero natural.

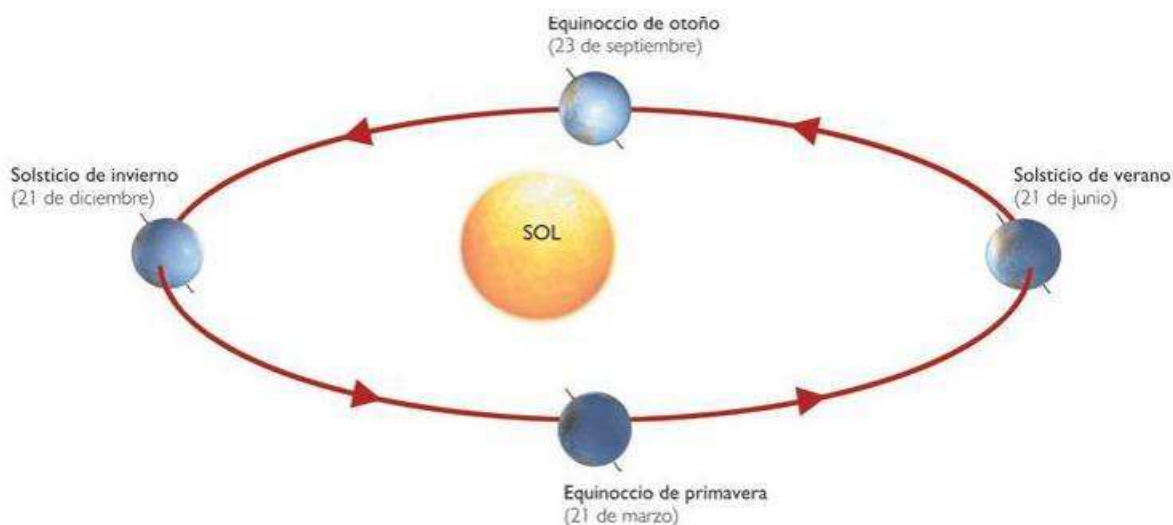


Las nubes, el vapor de agua y el dióxido de carbono absorben radiación de onda larga y ayudan a mantener la temperatura de la superficie terrestre, especialmente en la noche. Una cubierta de nube absorbe radiación de onda larga y la reemite hacia la superficie en la noche, pero en las noches con cielos despejados la radiación escapa al espacio, haciendo disminuir más la temperatura nocturna. Las noches con cielos despejados son mas heladas que las con cielo nublado, por el contrario durante los días nublados, las máximas temperaturas son menores que con cielo despejados, ya que las nubes impiden el paso de la radiación solar directa. Por ejemplo los desiertos son muy cálidos en el día y muy fríos en la noche por causa de este efecto.

#### **5.2.6. Movimiento aparente del sol**

Es de conocimiento general que el sol sale por el este, al mediodía se levanta sobre el sur y se pone por el oeste, y también que los días de verano son mas largos que los de invierno. Sin embargo, para el estudio científico de la influencia del soleamiento es preciso determinar con suficiente precisión la posición del sol en la bóveda celeste para cualquier localidad, fecha e instante del día.

El movimiento aparente del sol en el espacio, véase figura 4, está regido por las leyes de la mecánica celeste, y sus relaciones geométricas se expresan en fórmulas de trigonometría esférica, en función de la latitud del lugar  $\phi$ , la declinación de la época del año  $\delta$  y el ángulo horario  $\omega$  del instante del día, parámetros que se describen a continuación.



*Figura 4. Movimiento y declinación de la Tierra respecto al sol.*

- La latitud  $\varphi$  es el arco que existe entre el paralelo que pasa por el lugar y el ecuador.
- La declinación  $\delta$  es el ángulo formado por el plano del ecuador y el plano de la órbita terrestre, debido a la inclinación del eje de la tierra. La declinación es función de la fecha, siendo máxima en el solsticio de verano ( $\delta = +23.45^\circ$  el 22 de junio), nula en los equinoccios ( $\delta = 0^\circ$  el 22 de marzo y el 22 de septiembre), y mínima en el solsticio de invierno ( $\delta = -23.45^\circ$  el 22 de diciembre). La declinación se puede estimar analíticamente para cualquier fecha del año con suficiente precisión considerando que es una función sinusoidal del día ordinal del año "d" (1 a 365) con valor nulo el 22 de marzo (81º día del año) mediante la siguiente expresión:

$$\delta = 23.45 \cdot \text{Sen} \left[ 360 \frac{d - 81}{365} \right] \quad (15)$$

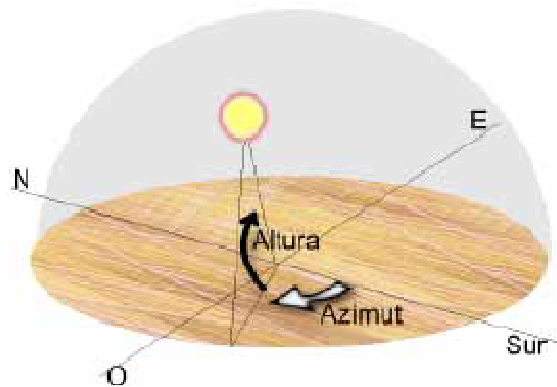
- El ángulo horario  $\omega$  es el formado entre la posición del sol a la hora considerada y su posición al mediodía, medido sobre el círculo de su órbita. El sol recorre  $15^\circ$  a la hora ( $360^\circ$  en 24 horas), y se mide a partir del mediodía (12:00 hora solar local), con ángulos negativos antes del mediodía y positivos

después del mediodía. Para determinar el ángulo horario se usa la siguiente expresión en función de la hora solar local  $t_s$  (0:00 a 24:00 horas):

$$\omega = 15(t_s - 12) \quad (16)$$

### 5.2.7. Coordenadas solares

La posición del sol en el cielo se suele determinar por la elevación del sol sobre el horizonte o altura solar “A”, y por el ángulo entre la proyección del sol sobre el horizonte y el sur, llamado azimut “Z”, midiéndose con valores negativos hacia el este y con valores positivos hacia el oeste, como se observa en la figura 5.



Estos ángulos dependen de la latitud  $\phi$ , de la declinación  $\delta$  y del ángulo horario  $\omega$ .

*Figura 5. Esquema de Altitud Solar y Azimut*

- Azimut: Orientación. Posición angular del Sol en el plano horizontal respecto a un centro, tomando como ángulo de referencia  $0^\circ$  el Norte. Define la hora del día (el sol sale por el Este= $90^\circ$  y se pone por el Oeste= $180^\circ$ ). El azimut “Z” se puede determinar por la expresión:

$$Z = \arcsen\left[ \frac{\cos \delta \cdot \sen \omega}{\cos A} \right] \quad (17)$$

- Altitud: Ángulo vertical entre el horizonte y el sol, medido con un sextante. Es decir, el ángulo entre el plano horizontal y el sol, medido en el plano vertical desde un punto de referencia. La altitud cambia cada día durante el año solar (De  $0^\circ$  a  $90^\circ$ ), siendo más bajo en invierno y más alto en verano (según la

situación geográfica desde donde se mida). La altura solar “A” se puede determinar por la expresión:

$$A = \arcsen(\sen\varphi \bullet \sen\delta + \cos\varphi \bullet \cos\delta \bullet \cos\omega) \quad (18)$$

#### 5.2.8. Medición de la radiación solar

La radiación solar al nivel del suelo se suele medir actualmente con diferentes tipos de aparatos, con características y grados de precisión diversos, utilizados en estaciones meteorológicas y en laboratorios especializados.

El aparato mas elemental es el heliógrafo, como el modelo Campbell-Stokes, que permite determinar el número de horas efectivas de sol, pero sin llegar a determinar la intensidad de la radiación solar.

El instrumento más convencional para la toma de datos fiables es el piranómetro, véase figura 6, que permite medir la intensidad de la radiación solar que incide sobre una superficie. Generalmente se monta horizontalmente, midiendo la radiación solar horizontal total, que es la suma de la radiación directa más la difusa. También puede medirse sólo la radiación difusa si se obstruye la radiación directa en su recorrido aparente mediante un estrecho anillo convenientemente situado.



*Figura 6. Piranómetro*

Otro instrumento mas sofisticado es el pirheliómetro, que mide la radiación directa normal, por lo que es necesario enfocararlo directamente al sol en su movimiento. Este aparato de precisión permite estudiar bandas del espectro mediante el uso de filtros. Un dato que se suele tomar en las estaciones es la nubosidad del cielo, que se mide visualmente en 1/8 o 1/10 de cielo cubierto, a veces con descripción del tipo de nubes, pero que tiene poca precisión por su naturaleza de observación visual.

La mayoría de las estaciones meteorológicas disponen de heliógrafos, aunque solo las más importantes disponen además de piranómetros, siendo los centros de investigación los únicos que dispones de pirheliómetros u otros aparatos solares de laboratorio. En la práctica es relativamente sencillo obtener datos de horas de sol efectivas para poblaciones importantes, siendo escasas las estaciones con datos de radiación global diaria, por no mencionar aquellas en las que además se dispongan de datos de radiación horaria o difusa.

Las estaciones de medida de radiación solar están distribuidas en el territorio de manera que se puedan realizar estudios o mapas de radiación a gran escala, pero desgraciadamente este tipo de estaciones no son lo suficientemente numerosas para poder determinar características microclimáticas.

## 5. DESARROLLO DEL TRABAJO

La arquitectura bioclimática comienza a abrirse hueco entre los distintos estilos que integran el sector de la construcción. El primer objetivo de la arquitectura bioclimática será concebir una vivienda que administre de una forma óptima las aportaciones solares e intentar satisfacer de esta forma sus necesidades en baja temperatura. Se trata de controlar por tanto, las transmisiones de calor en los dos sentidos, es decir, tanto del interior al exterior como a la inversa. Implica una concepción de la vivienda que tenga en cuenta el paraje y su clima. Una concepción de paredes que utilicen adecuadamente los fenómenos térmicos. Y de un modo más general, una toma de conciencia de lo que es el bienestar y de los medios ecobiológicos para conseguirlo, por parte de sus ocupantes.

La edificación ecológica no sólo comprende el ahorro en el consumo energético, sino que afecta a todos los procesos de la fabricación como la elaboración de los materiales, el transporte de estos, la puesta en marcha de la obra, la utilización del edificio o derribo y la posible recuperación de los materiales. La utilización de manera sostenible de este tipo de diseño permite economizar entre el 50 y el 70% del consumo de combustible, de la energía convencional y del sistema de climatización, esto además provocará un ahorro económico importante en los costes finales del proyecto. En la misma proporción es posible la disminución de los agentes contaminantes a la atmósfera. Asimismo, contribuye a disminuir hasta un total del 30% en el gasto de agua y un 20% en iluminación, el inconveniente principal de este tipo de vivienda es el mayor coste de construcción de la vivienda, el cual puede ser rentable, ya que el incremento de la vivienda se compensa con la disminución de los recibos de energía, pero a siempre a largo plazo y eso en los tiempos que corren es un problema, ya que se buscan resultados inmediatos en todos los campos de actuación.

Todos estos factores han llevado actualmente a introducir el término de tecnología bioclimática de la arquitectura. Dentro de esta tecnología bioclimática encontramos técnicas como la iluminación natural, ventilación natural... medidas de acondicionamiento pasivo o ambiental en edificios, y también se introducen nuevos tipos de materiales y sistemas constructivos para mejorar la calidad interior de la edificación.

En definitiva la arquitectura bioclimática debe de considerar tanto el confort de manera global como el ahorro energético y, en este sentido, actualmente cada vez son más los proyectos de arquitectura que lo tienen en cuenta en edificios de viviendas y en edificios destinados a servicios públicos.

El desarrollo de este trabajo está ligado a la arquitectura bioclimática, ya que el objetivo del mismo es el análisis del comportamiento térmico por radiación, de una edificación en fase de proyecto, a partir de una simulación virtual realizada con un programa informático de dinámica de fluidos. Con este análisis será posible aplicar mejoras necesarias para optimizar su comportamiento térmico antes de su construcción y así conseguir un ahorro energético y económico de la edificación.

## **6.1. ANÁLISIS PROGRAMAS INFORMÁTICOS DE SIMULACIÓN**

### **VIRTUAL DE DINÁMICA DE FLUIDOS**

Se analizarán algunos de los programas informáticos que ofrece el mercado en la actualidad en el campo de la simulación virtual de dinámica de fluidos computacional, y posteriormente se realizará una simulación con el programa STAR CCM+ para el estudio del comportamiento térmico de un modelo de edificación determinado, y así estudiar la viabilidad de este tipo de programa en el campo de la edificación.

Se van a analizar tres programas de simulación, ANSYS FLUENT, FLOW-3D y STAR CCM+.

En el campo de la simulación virtual de dinámica de fluidos computacional destaca un programa sobre los demás, se trata de ANSYS FLUENT. Es el programa de mayor preferencia dentro de este campo.

El software provee múltiples opciones de solución que combinado con métodos Multigrid para mejorar la convergencia, se obtienen soluciones eficientes y precisas para un amplio régimen de flujos. La gran variedad de modelos físicos permite predecir con gran exactitud flujos laminares y turbulentos, transferencia de calor (radiación, convección, conducción), reacciones químicas, flujos multifásicos y otros fenómenos involucrados; posee una gran capacidad de flexibilidad de mallas, siendo capaz de que automáticamente cambie la malla durante el proceso de solución, algo que aun no se ha visto en otros programas de este tipo, bastante limitados en este aspecto.

Las capacidades de simulación de FLUENT a grandes rasgos son las siguientes:

- Simulaciones 3D, 2D plano, 2D axisimetrica, 2D axisimetrica con swirl.



- Mallado no estructurado (triángulos y cuadriláteros en 2D; tetraedros, prismas y pirámides en 3D)
- Simulaciones de flujo estacionario o transitorio.
- Cualquier régimen de velocidad (subsónico, transónico, supersónico e hipersónico)
- Flujos laminares, turbulentos, no viscosos.
- Flujos newtonianos y no newtonianos.
- Amplia variedad de modelos de turbulencia, incluyendo k-epsilon, k-omega, RSM, DES, y LES.
- Transferencia de calor incluyendo convección natural, forzada o mezclada; transferencia de calor conjugada sólido/fluido; radiación incluyendo radiación solar.
- Mezclado y reacción de especies químicas, incluyendo modelos de combustión homogénea y heterogénea y modelos de reacción/deposición en superficies.
- Modelos multifase y de superficie libre, incluyendo transferencia de calor y reacciones químicas.
- Cálculos de trayectorias Lagrangianas para fase dispersa (partículas, gotas, burbujas), incluyendo modelos para sprays y películas delgadas
- Modelos de cambio de fase para aplicaciones de solidificación y fundición, modelo de cavitación y modelo de vapor húmedo.
- Medio poroso con permeabilidad no isotrópica, resistencia inercial, conducción de calor en sólidos, y opción para calcular velocidades intersticiales.
- Modelos para ventiladores, radiadores e intercambiadores de calor.
- Capacidad de mallado dinámico para modelar flujo alrededor de objetos que se mueven durante la simulación.
- Marcos de referencia inercial (estacionario) o no inerciales (rotación o aceleración).
- Múltiples marcos de referencia y opciones de malla deslizable.
- Modelo de mezclado en planos para interacciones rotor-estator.
- Conjunto de herramientas para modelaciones aeroacústicas.
- Términos fuente volumétricos para masa, calor y especies químicas.

- Base de datos de propiedades de materiales.
- Acoplamiento dinámico, con GT-Power y WAVE.
- Módulos adicionales para celdas de combustible, magnetohidrodinámica y modelamiento continuo de fibra.
- Amplia capacidad de personalización a través de funciones definidas por el usuario (programación).

El software FLOW-3D se trata de otra opción en el mercado en el campo de la simulación virtual de dinámica de fluidos, aunque no tiene tantos adeptos como FLUENT.

FLOW-3D es una herramienta de modelado de gran alcance que permite obtener información valiosa en muchos procesos de flujo físico. Posee capacidades especiales para predecir con exactitud los flujos de la superficie libre. Las opciones más destacadas de FLOW-3D son:

- Separa mallado de la geometría de construcción.
- Fácil de utilizar en su fase de diseño.
- Utiliza una técnica especial para definir las regiones geométricas en general dentro de la cuadrícula rectangular, conservando la simplicidad de los elementos rectangulares, mientras que representan formas geométricas complejas.
- Se diferencia de otros programas de dinámica de fluidos computacional en el tratamiento de superficies de flujo de fluidos. El programa utiliza métodos numéricos especiales para rastrear la ubicación de las superficies y aplicar las condiciones dinámicas de contorno adecuadas en esas superficies.
- Ofrece un bloque de mallas múltiples, que está diseñado para añadir mayor flexibilidad y eficiencia a la malla.



El último programa que se va a analizar es el software STAR CCM+. Se trata del software con el que voy a realizar una simulación para estudiar el comportamiento térmico por radiación solar en una edificación. Los aspectos más destacados del software son:

- Incluye una amplia gama de modelos físicos, que proporcionan al usuario un conjunto de herramientas capaces de abordar los problemas de ingeniería más complejos.
- Emplea una tecnología de mallado de poliedros o hexaedros. Las mallas se ajustan estrictamente a la geometría, teniendo así una mayor precisión de mallado.

En el apartado siguiente se describirá el software con mayor profundidad.

## 6.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE INFORMÁTICO STAR CCM+

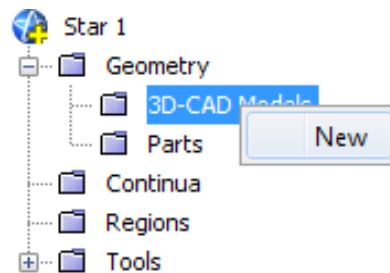
El programa informático STAR CCM+ se trata de un software de simulación virtual de dinámica de fluidos que posee un amplio abanico de posibilidades, atendiendo a las condiciones físicas que sean seleccionadas. En este caso voy a estudiar el comportamiento térmico por radiación de un modelo.

El programa permite básicamente los siguientes puntos:

1. Dibujar el modelo con el programa: Fase de diseño del modelo, una vez finalizado el diseño exportamos el dibujo.
2. Distinción de las partes que quiero estudiar: Se importa el dibujo, exportado en el punto anterior y se procede a distinguir los elementos del modelo que tendrán diferentes propiedades.
3. Mallado del modelo: Elección del tipo de mallado que se quiera aplicar (tetraédrico...) y sus condiciones de mallado.
4. Definición de las condiciones físicas: En esta fase del proceso se seleccionan las condiciones físicas dependiendo del modelo que se quiera estudiar.
5. Definición de las condiciones físicas del entorno: Se introducirán los datos correspondientes a las condiciones físicas seleccionadas anteriormente.
6. Visualización de resultados: Se pueden crear planos de corte o visualizar los resultados sobre el modelo completo.
7. Introducción de nueva formulación de cálculo: Se trata de una opción del programa para introducir formulas y poder visualizar los resultados en escenas.

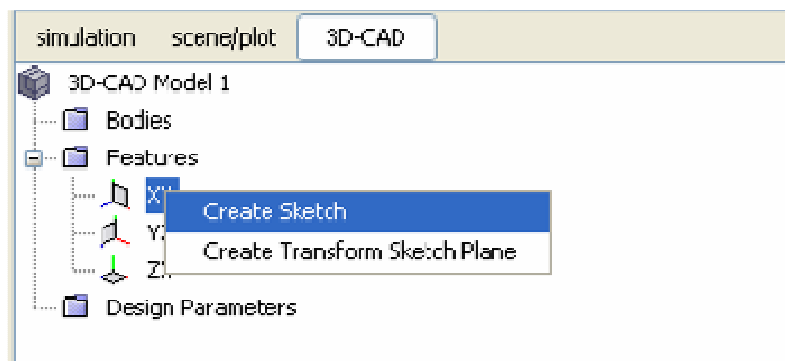
## 1. Dibujar el modelo con el programa

Antes de empezar a dibujar abro la carpeta *Geometry* y presionando botón derecho del ratón sobre la subcarpeta *3D-CAD Models*, creo un nuevo papel de dibujo como se observa en la figura 7.



*Figura 7. Nuevo Dibujo*

En la carpeta *Features* aparecerán los diferentes planos de trabajo en perspectiva que se pueden utilizar, uno horizontal y dos verticales. Presionando sobre uno de los planos y seleccionando *Create sketch* comienzo el trabajo de dibujo, como se observa en la figura 8. Se creará un nuevo archivo, el cual cambio de nombre presionando botón derecho del ratón y seleccionando *Rename*.



*Figura 8. Planos de trabajo*

El plano de trabajo que he utilizado en esta simulación es el plano XY, realizando la extrusión del modelo en el eje Z.

Una vez se tengo definido el plano, comienzo a dibujar el modelo en el programa. Esta tarea puede realizarse de tres formas diferentes:

- Sobre el plano de boceto
- Sobre una cara
- Al extraer los bordes que definen una cara

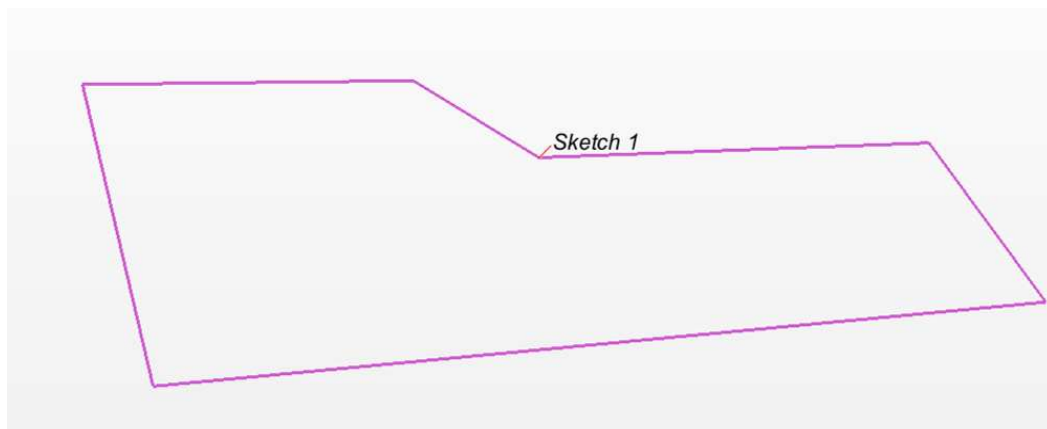
Una vez realizados los planos de bocetos trabajo sobre ellos utilizando las siguientes herramientas (figura 9) que aporta el programa para dibujar el modelo

- Puntos
- Líneas
- Rectángulos
- Rectángulos de tres puntos
- Círculos
- Arcos circulares
- Elipse
- Splines



*Figura 9. Herramientas de dibujo*

En la figura 10 se observa la planta definida perfectamente y lista para extrusionar.



*Figura 10. Planta del modelo*

Una vez dibujada la planta en 2D procedo a darle altura, seleccionando *Create Extrude*. Creo un nuevo archivo como se observa en la figura 11, al que le cambio de nombre presionando botón derecho del ratón y seleccionando *Rename*.

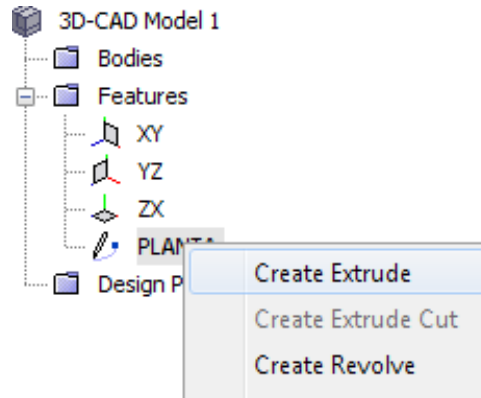


Figura 11. Extrusión de la planta del modelo

En la pestaña *direction* podré seleccionar tres opciones:

- *Normal*: Dirección de extrusión positiva perpendicular a la planta
- *Reverse*: Dirección de extrusión negativa perpendicular a la planta
- *Specified*: Asigno los valores en las direcciones requeridas para extrusiones oblicuas.

En la figura 12 se observa como la opción escogida en *direction* es *Normal*.

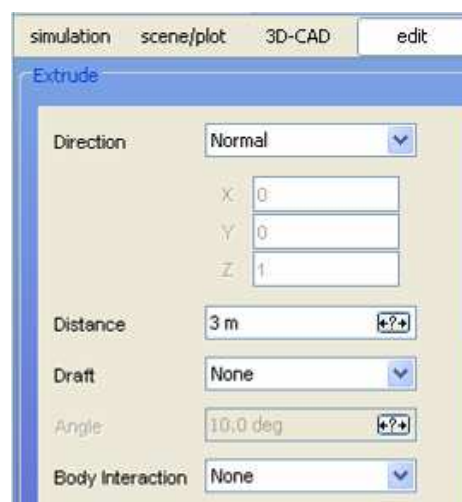


Figura 12. Menú de extrusión

En la pestaña *distance* introduzco la altura deseada de extrusión, la altura es de 3 metros, y en la pestaña de *Body interaction* escojo la opción *None*. Pulsaré la pestaña de OK y obtendré la planta en 3D como se observa en la figura 13.

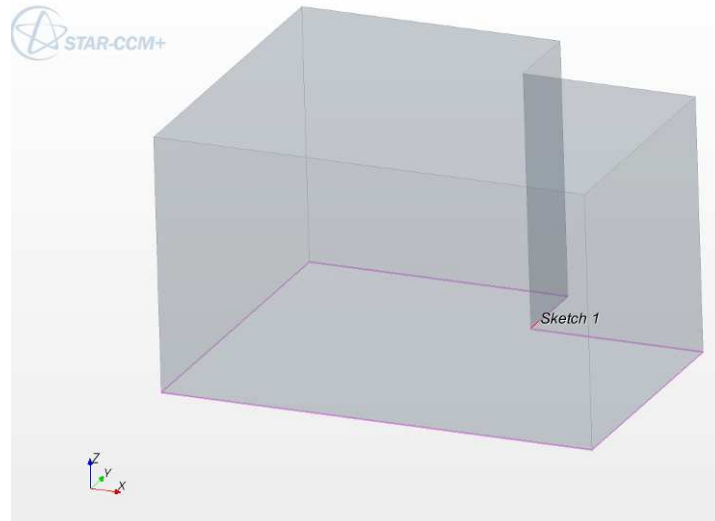


Figura 13. Modelo en 3D

Una vez que se tiene el modelo en 3D, me preparo para dibujar las ventanas: Creo un plano de dibujo en la cara deseada. Selecciono la cara deseada y presiono el botón derecho para escoger la opción *Create Transform Sketch Plane* como se observa en la figura 14.

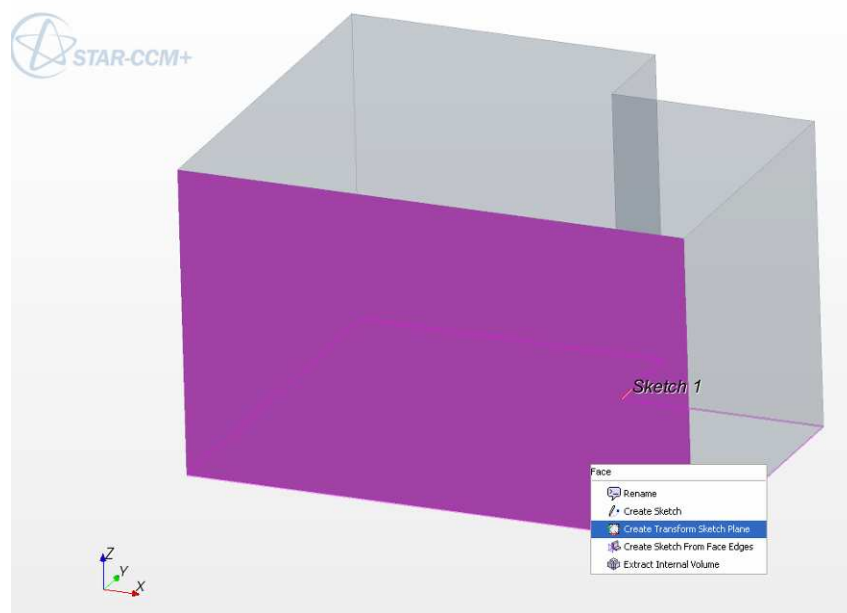
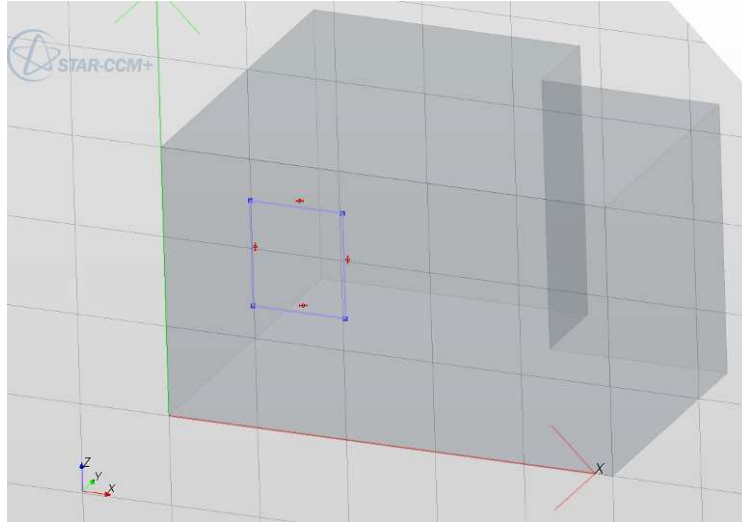


Figura 14. Creación de un plano en una cara del modelo



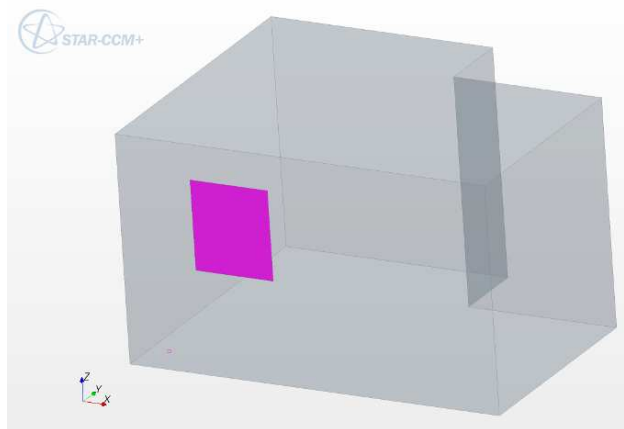
Para dibujar sobre ese plano: botón derecho sobre el plano – *Create sketch*, y ya puedo dibujar las ventanas sobre ese plano que he creado como se ve en la figura 15.



*Figura 15. Modelado de ventanas en el plano*

Una vez terminado el dibujo de las ventanas, son extruidas como anteriormente la planta, sólo que a diferencia de la anterior será seleccionada la pestaña *Imprint* en *Body Interaction* en lugar de *None*, de esta manera el programa diferencia la zona de contacto de los cuerpos del resto del cuerpo. La altura de extrusión de las ventanas es de 0,01 metros ya que no va a ser representativa.

Una vez llegado a este punto, el dibujo del modelo esta totalmente acabado, tanto la planta como las ventanas esta dibujadas y extruidas, el resultado se observa en la figura 16.



*Figura16. Modelo*

Tras haber extruido las ventanas, el siguiente paso es cambiar los nombres de las extrusiones y los *Sketch* creados para evitar confusiones más adelante. En la carpeta *Feature* pulso sobre cada uno de ellos con el botón derecho y en la opción *Rename*, cambio los nombres.

Una vez terminada la parte de dibujo me dispongo a exportar el modelo, para ello antes debo de unir todos los cuerpos que tengo, abro la carpeta *Bodies*, selecciono todos los objetos para interaccionar entre ellos y presionando botón derecho del ratón selecciono *Boolean – Unite* como se observa en al figura 17. Y pulso la pestaña de OK para unir todos los cuerpos.

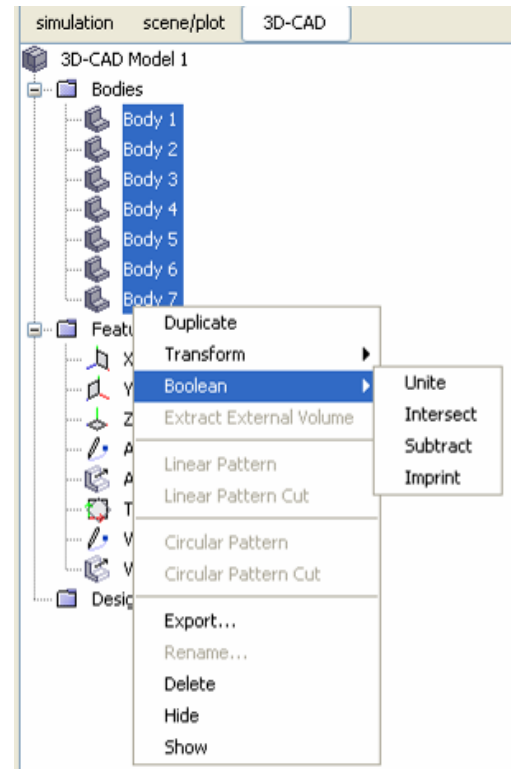
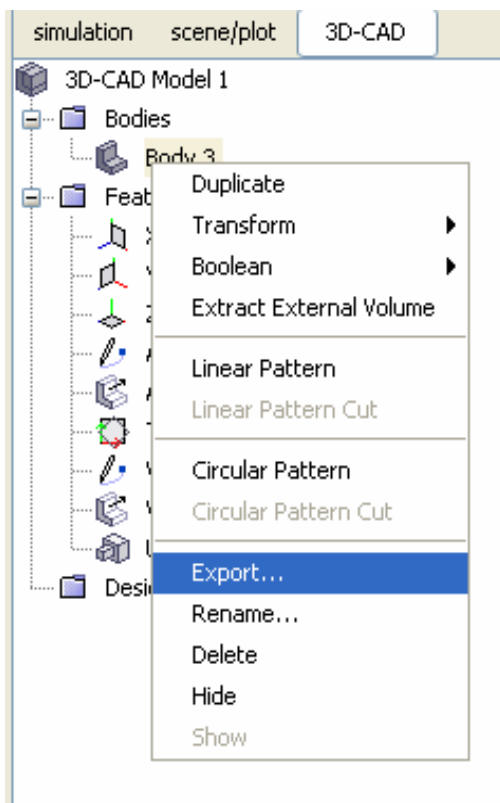


Figura 17. Unión de Bodies



Ahora voy a exportar el dibujo, para ello pincho con el botón derecho del ratón sobre el Body único que he creado anteriormente y escojo la opción *Export*, como se observa en al figura 18, y con la extensión *.x\_b.*, guardo el archivo que después tengo que importar. Cierro el archivo para posteriormente importarlo.

Figura 18. Menú para exportar dibujo

## 2. Distinción de las partes que quiero estudiar

Abro de nuevo el programa, nueva simulación, *File – Import surface mesh* – como se observa en la figura 19 y elijo el archivo exportado anteriormente en formato .x\_b. y lo abro para trabajar sobre el.

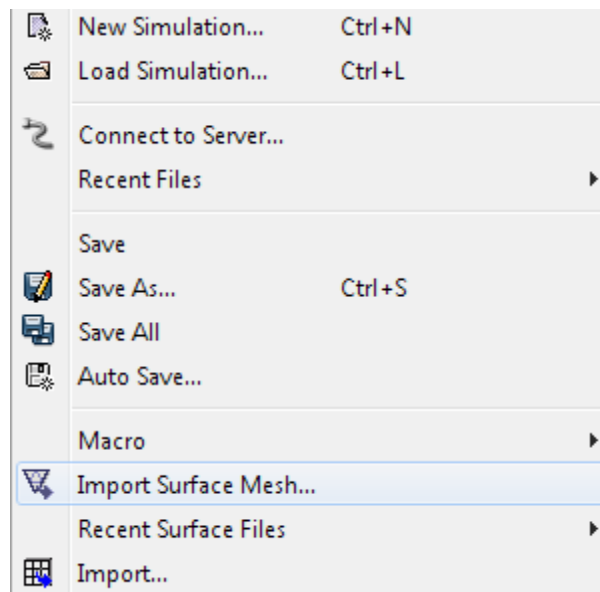


Figura 19. Menú para importar el archivo exportado anteriormente

Para denominar cada cara del objeto me sitúo en la pestaña *Simulation*, carpeta *Regions*, subcarpetas *Body - Boundaries* y presiono botón derecho del ratón, selecciono *Split by patch* como se observa en la figura 20.

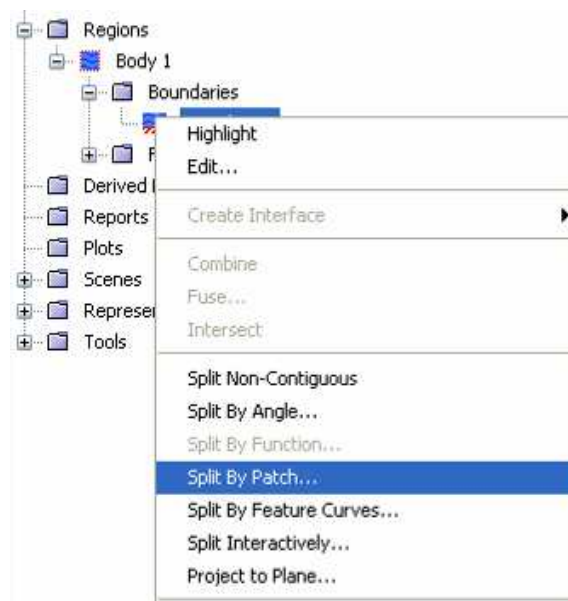


Figura 20. Menu Split by patch.

Una vez pulsado esta opción iré renombrando cada cara de nuestro dibujo como se observa en la figura 21, sin olvidar presionar *Create* cada vez que formulemos una. Se observa como al ser creado el objeto se hace invisible en la figura 22. En la última cara se optará por cerrar el apartado y se nombrará desde el listado de *Boundaries*.

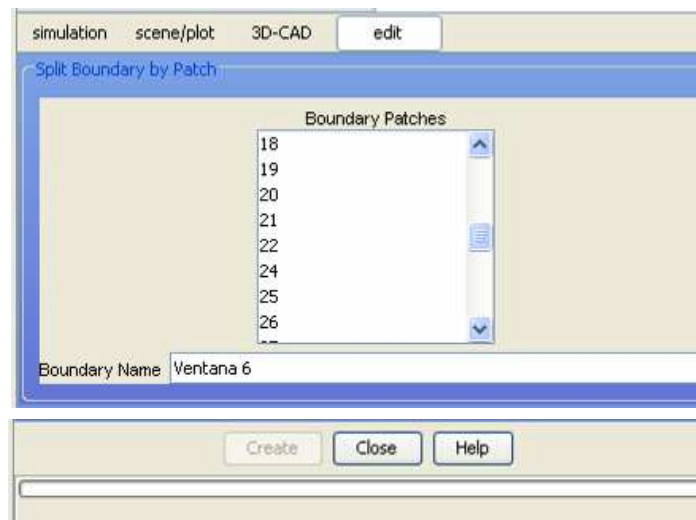


Figura 21. Menú *Split By Patch*

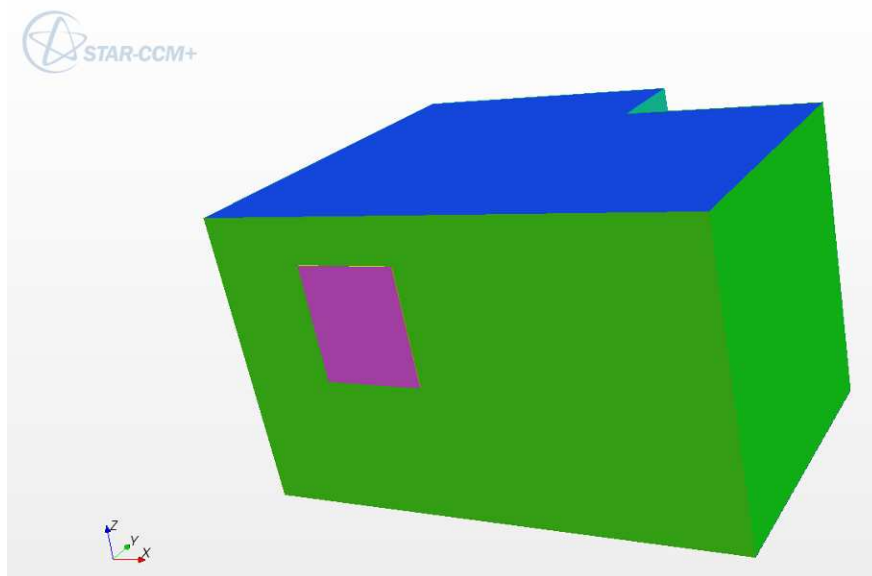


Figura 22. Modelo en menú *Split By Match*

Para nombrar esta última cara presionaré sobre Boundary con el botón derecho y seleccionaré la opción *Rename* para cambiar el nombre del archivo.

### 3. Mallado del aula

Para definir las condiciones del mallado me sitúo en la pestaña *Simulation*, carpeta *Continua*, subcarpetas *Mesh - Models* y presionando doble clic botón izquierdo del ratón aparecerá la ventana de la figura 23.

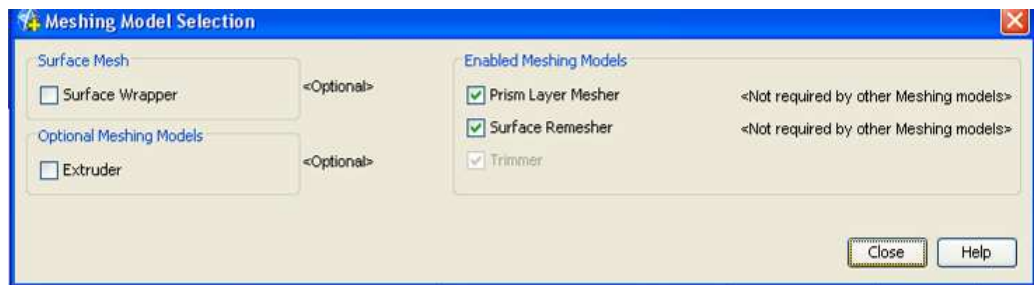


Figura 23. Modelo de mallado

Las opciones que escojo para realizar el mallado son los siguientes parámetros:

- *Surface Remesher* (mallado de todo el volumen).
- *Trimmer Mesher* (determina que el mallado es en forma de cuadrícula).
- *Prism Layer Mesher* (capas prismáticas, capa límite; malla con mayor densidad las zonas límites del conjunto).

La opción *trimmer* determina un mallado en cuadrícula menos complejo que la opción tetraédrica.

Para definir los datos exactos del mallado me situó en la pestaña *Simulation*, carpeta *continua*, subcarpetas *Mesh - Reference Values* y pulso en ella con el botón derecho y vamos a *Edit* como se observa en la figura 24.

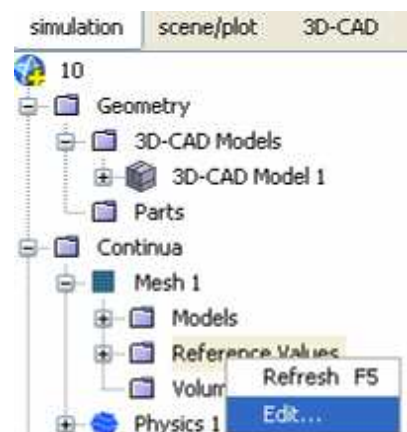


Figura 24. Condiciones de mallado

En el menú correspondiente a la figura 25, defino los siguientes parámetros para realizar el mallado:

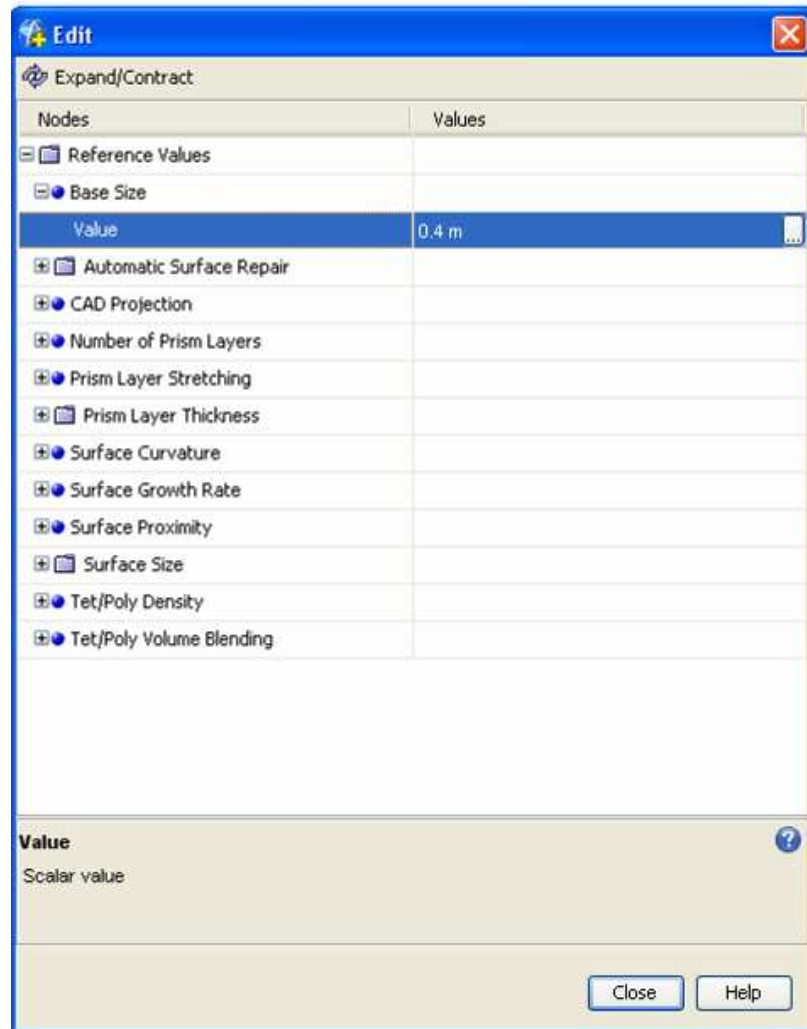


Figura 25. References Values

- Base Size - Existirá una mayor precisión en los datos de cálculo cuanto menor sea el dato. Será un dato menor que mi menor dimensión en el dibujo.
- Relative Size 100%
- Surface Size - Relative minimum size.
- Surface Growth Rate - Proporción del crecimiento de la capa límite.
- Prism Layer Thickness - Espesor total del número de capas, si es un dato exacto diremos *absolute*.
- Number of Prism Layers - N° capas ajustadas a la capa límite.

El siguiente paso tiene como misión realizar un mallado más ajustado y preciso en los puntos más sensibles, como pueden ser las ventanas del aula. Para ello selecciono la cara a ajustar en la subcarpeta *Regions – boundaries*, presiono el botón derecho y lo edito. Dentro de *Mesh Conditions* activo *Custom surface Size* y modifico los datos de *Relative Minimum Size* y *Relative Target Size* como se observa en la figura x. El valor que le doy en la figura 26, es de 25, esto indicará que se reduce al 25% del tamaño inicial del mallado en esa parte específica.

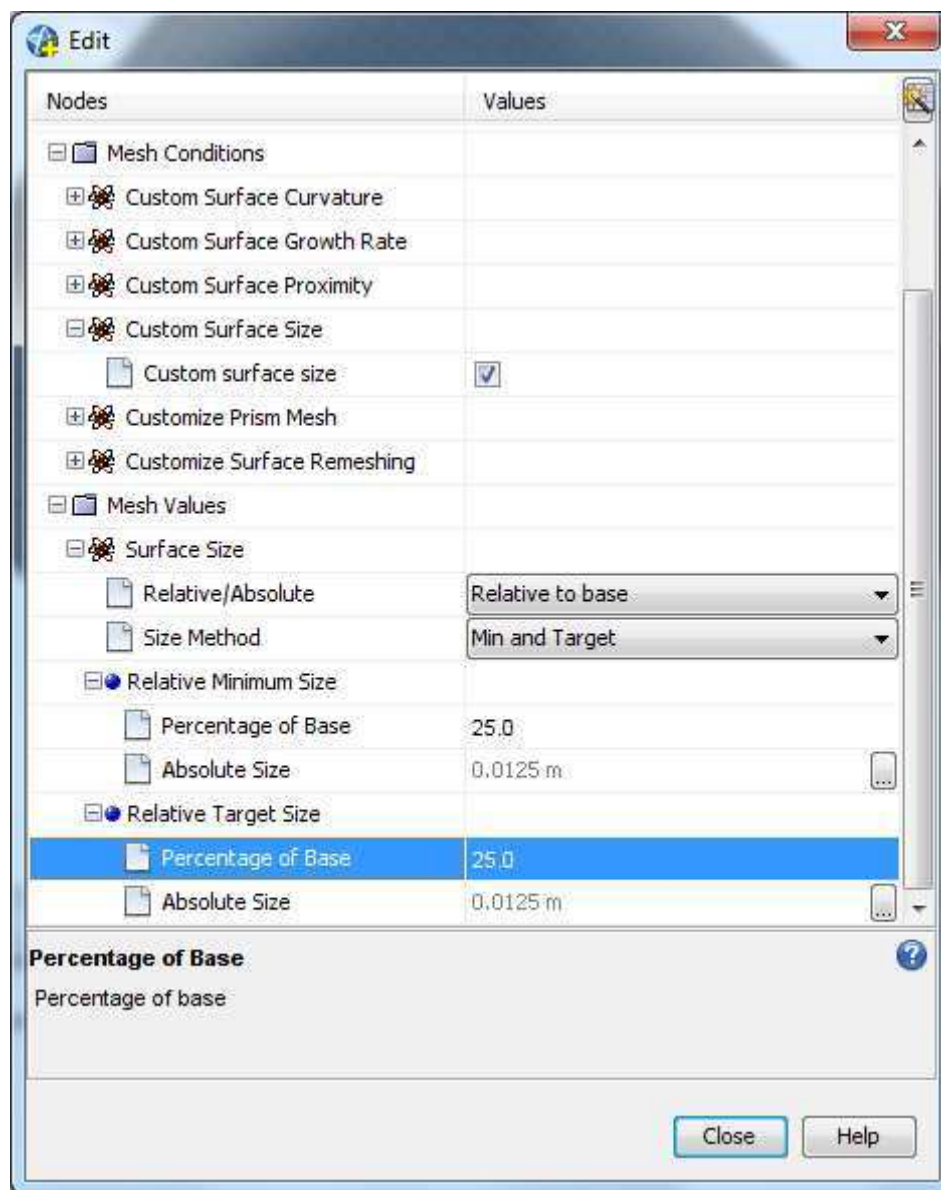
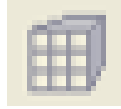


Figura 26. Mesh Values



Para crear nuestro mallado utilizaré el icono *Generate Volume Mesh* como se observa en la figura 27.

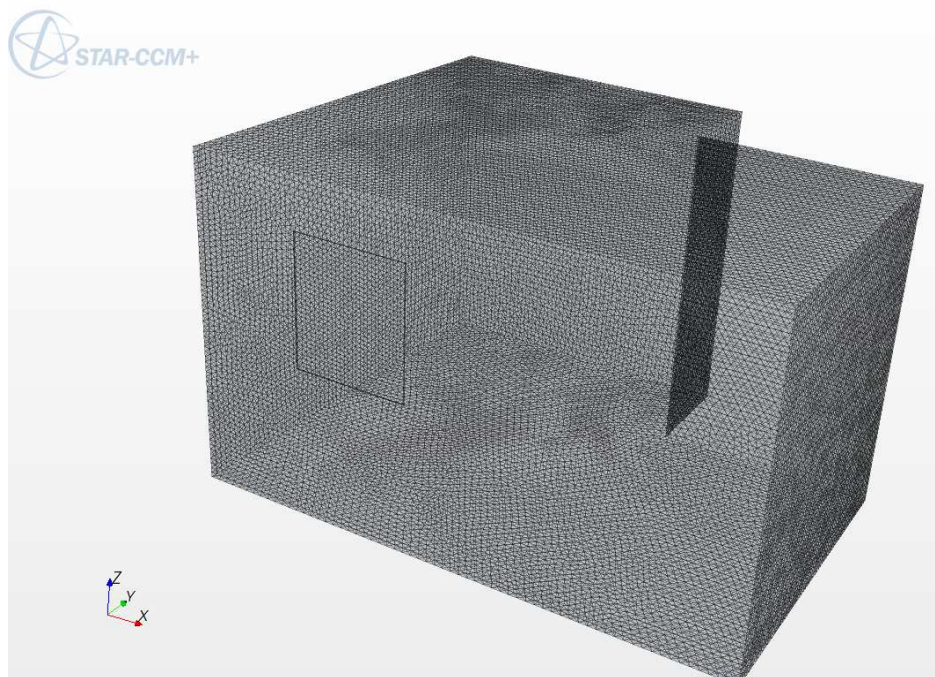


*Figura 27. Icono para mallar*

Para observar el mallado del objeto en el mismo utilizamos el icono *Mesh on*.

Para poder visualizar el mallado me sitúo en la carpeta *Representations* y arrastro la subcarpeta *Volume Mesh* a la imagen.

En la figura 28, se observa el modelo una vez realizado el mallado.



*Figura 28. Mallado del modelo*



#### 4. Definición de las condiciones físicas

Para definir las condiciones físicas del trabajo me sitúo en la pestaña *Continua*, subcarpeta *Physics1* y selecciono *Select Models* apareciendo una ventana en la cual selecciono los parámetros de la figura 29 para determinar, en este caso, el comportamiento térmico por radiación del modelo, si quisiera realizar un estudio de ventilación por ejemplo seleccionaría otras condiciones físicas.

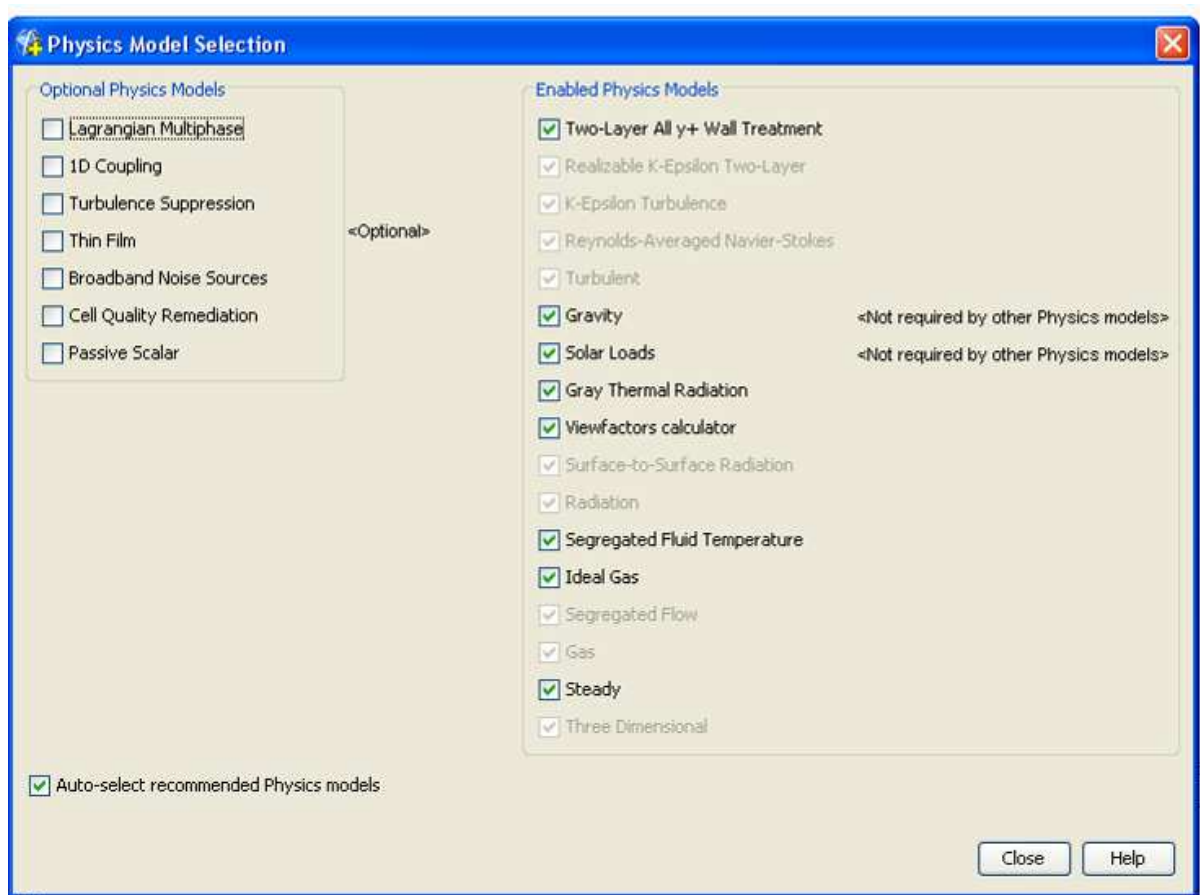


Figura 29. Parámetros físicos seleccionados

A continuación voy a definir paso a paso los parámetros que ofrece el programa informático para realizar otro tipo de estudios diferente al comportamiento térmico de un modelo.

### Space (Figura 30)

- *Two Dimensional*: Se activará si la malla es de dos dimensiones. En este modelo, la malla se supone que tienen una profundidad de la unidad, de modo que las cantidades volumétricas se supone que son “por metro”.
- *Axisymmetric*: Para trabajar en dos dimensiones mallas con simetría axial. La malla debe estar orientada de tal manera que el eje de rotación será en  $y = 0$  en el espacio global de coordenadas. Ninguna parte de la malla puede estar por debajo de  $y = 0$ , y el borde del límite que se encuentra a lo largo del eje debe ser de Eje tipo. Cualquier área consignada para el modelo de simetría axial se supone que son para un 1 sector radianes.
- *Three Dimensional*: Se activará si la malla es en tres dimensiones.

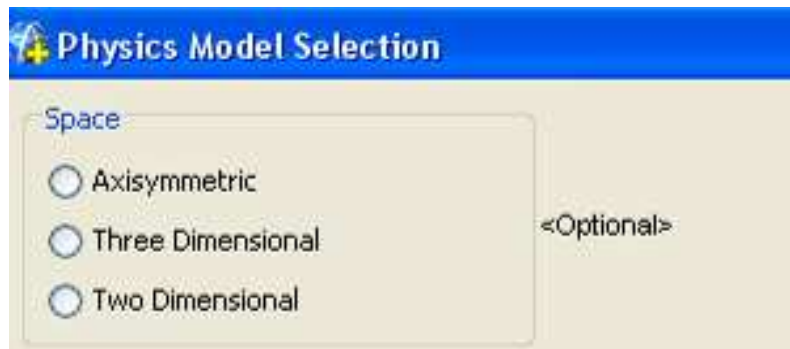


Figura 30. Opciones Space

### Time (Figura 31)

- *Steady*: Se utiliza para todos los cálculos de estado estacionario. Cuando este modelo se activa, el concepto de tiempo no tiene sentido.
- *Implicit Unsteady*: Modelo compatible con corrientes de flujo y corrientes de energía fluida. Su función principal es controlar la actualización en cada tiempo físico para el cálculo. También controla el tamaño de paso de tiempo.

- *Explicit Unsteady*: Disponible con el modelo de acoplamiento de energía. Su función principal es controlar la actualización interactiva para el cálculo.



Figura 31. Opciones Time

#### Material (Figura 32)

- *Gas*: Se utiliza para simular un gas puro. Por defecto, el modelo de gas toma como material el aire de la base de datos de materiales. Se puede cambiar haciendo clic con el botón derecho en la carpeta *Air* dentro de la propiedad de Gas, igualmente se pueden cambiar sus propiedades.

- *Liquid*: Se utiliza para simular un líquido puro. Por defecto, el modelo de líquido toma como material el agua de la base de datos de materiales. Se puede cambiar haciendo clic con el botón derecho en la carpeta *H2O* dentro de la propiedad de Gas, igualmente se pueden cambiar sus propiedades.

- *Solid*: Se utiliza para simular un sólido puro. Por defecto, el modelo sólido toma como material el Aluminio de la base de datos de materiales. Se puede cambiar haciendo clic con el botón derecho en la carpeta *Al* dentro de la propiedad de Gas, igualmente se pueden cambiar sus propiedades.

- *Multi-Component Gas*: Se utiliza para simular una mezcla miscible de dos o más gases puros. Inicialmente, la carpeta *Gas Components* está vacía. Es aquí donde hay que agregar, quitar y reemplazar los gases en la mezcla. La carpeta

- *Mixture Properties*: Es una carpeta administradora de las propiedades del material realizado con la mezcla de gases entero, como un todo, distinto de las propiedades de cada componente individual.
- *Multi-Component Liquid*: Se utiliza para simular una mezcla miscible de dos o más líquidos puros. Inicialmente, la carpeta *Liquid Components* está vacía. Es aquí donde hay que agregar, quitar y reemplazar los líquidos en la mezcla. La carpeta *Mixture Properties* es una carpeta administradora de las propiedades del material realizado con la mezcla de líquidos entero, como un todo, distinto de las propiedades de cada componente individual. Se puede activar la opción *Non-reacting* que simboliza un sistema que contiene una mezcla líquida de componentes múltiples, cuyos componentes no reaccionan químicamente entre sí.
- *Multi-Phase Mixture*: Se utiliza para modelar una mezcla de varias fases, es decir, una mezcla inmiscible de dos o más sustancias puras, ya sea en la fase gaseosa o líquida.

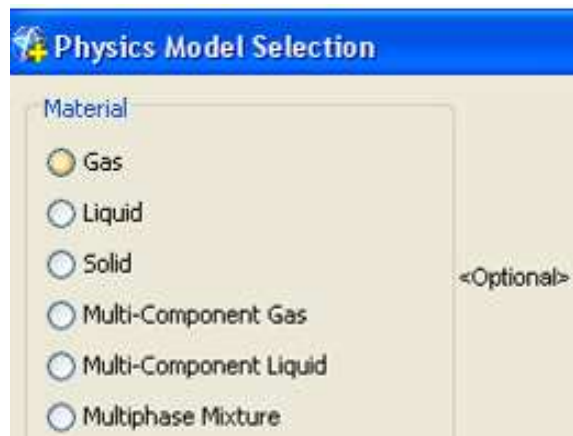


Figura 32. Opciones Material

### Flow (Figura 33)

- *Couple Flow*: Este modelo resuelve las ecuaciones de conservación de masa y tiempo simultáneamente con un tiempo apropiado ya marcando. La forma pre-acondicionado de las ecuaciones utilizadas por el modelo lo hace adecuado para resolver corrientes isotérmicas.
- *Segregate Flow*: Este modelo resuelve las ecuaciones de flujo (uno para cada componente de la velocidad, y uno para la presión) en una segregación, o no enganchados. El vínculo entre las ecuaciones de movimiento y la continuidad es alcanzado con un enfoque predictor-corrector.

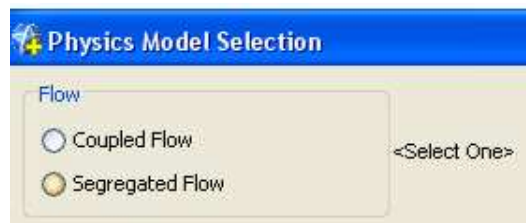


Figura 33. Opciones Flow

### Ecuation of Estate (Figura 34)

- *Constant Density*: Es la hipótesis de que la densidad es invariable durante todo el proceso. Está disponible para los gases, líquidos y sólidos.
- *Ideal Gas*: Se utiliza para expresar la densidad en función de la temperatura y la presión.
- *Polynomial Density*: Hace el supuesto de que la densidad es una función de la temperatura solamente.
- *Real Gas*: Existen tres modelos de cálculo que usan unas formulas diferentes basándose en unas constantes

- *User Defined Density*: Modelo definido por el usuario lo que le permite especificar la densidad del material, ya sea como una constante o una función de campo. El modelo también le permite indicar si el fluido es compresible, es decir, si la densidad es una función de la presión.

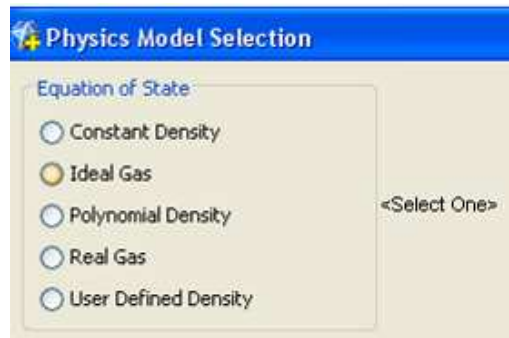


Figura 34. Opciones Ecuation of State

Viscous Regime (Figura 35)

- *Inviscid*: Son una idealización, resultado de descuidar los efectos de la parte viscosa en la simulación. Esta aproximación sólo es válida para ciertas situaciones físicas.
- *Laminar*: Se refiere a un flujo bien ordenado, libre de macroscópica y fluctuaciones que no se repiten.
- *Turbulent*: Representa un flujo que está en un estado de inestabilidad permanente, mostrando irregularidades de pequeña escala, de alta frecuencia en fluctuación en el espacio y el tiempo que se denomina turbulentos.



Figura 35. Opciones Viscous Regime

### Reynolds-Averaged Turbulence (Figura 36)

- *K-Epsilon Turbulence*: Ofrece un buen compromiso entre la robustez, coste computacional y la precisión. Por lo general, muy adecuado para aplicaciones de tipo industrial que contienen complejos de recirculación, con o sin transferencia de calor.
- *K-Omega Turbulence*: Similar al modelo K-Epsilon en que dos ecuaciones respecto al transporte son resueltas, pero difieren en la elección del segundo transporte que tiene una turbulencia variable. Las diferencias de rendimiento tienden a ser un resultado de las sutiles diferencias en los modelos. Este modelo es más aplicado en la industria aeroespacial.
- *Reynolds Stress Turbulence*: Es el más complejo y costoso. Son recomendados para situaciones en las que la turbulencia es fuertemente anisotrópicas, tales como el flujo de remolino en un separador de ciclón.
- *Spalart-Allmaras Turbulence*: Son una buena opción para aplicaciones en las que las capas límite son en gran parte unidas y la separación es leve si se produce. No se adapta a flujos que están dominados por las capas de corte libre, flujos donde se producen recirculación compleja (en particular con la transferencia de calor), o convección natural.

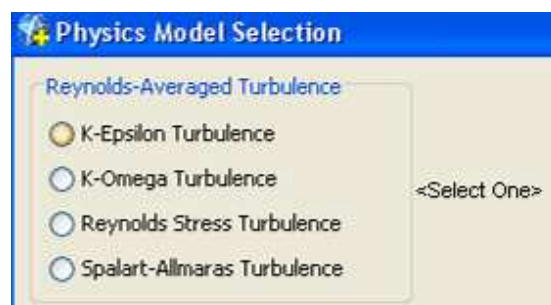


Figura 36. Opciones Reynolds-Averaged Turbulence

### Optional Physics Models (Figura 37)

Para estudiar el modelado con radiación solar selecciono ambas opciones. Una vez seleccionada la opción *Radiation* aparecerá una opción para modificar las características de radiación.

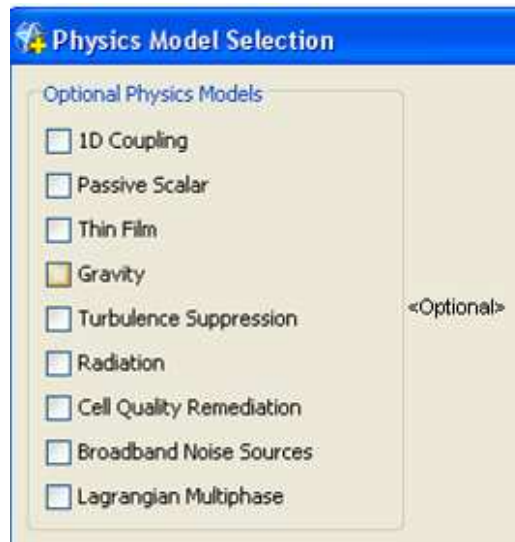


Figura 37. Opciones *Optional Physic Models*

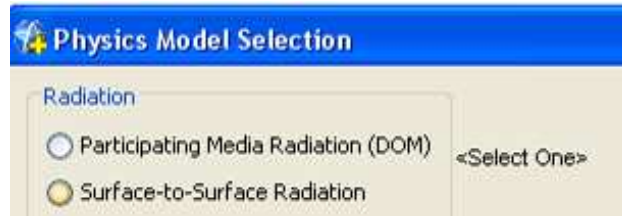
Las opciones para modificar las características de radiación son dos, véase en la figura 38, la escogida en este caso es *Surface-to-Surface Radiation*.

- *Surface-to-Surface Radiation*: Este modelo permite simular el intercambio de la radiación térmica entre las superficies difusas que forman un conjunto cerrado. El medio que llena el espacio entre las superficies no participa, es decir, que ni absorbe, ni emite, ni dispersa la radiación. En estas circunstancias, la cantidad de radiación recibida y emitida por cada superficie se define únicamente por las propiedades de la radiación de la superficie y las condiciones térmicas límite que se le impuso. Las propiedades de la superficie se cuantifican en términos de la emisividad, reflectividad, transmisividad y la temperatura de la radiación.

- *Participating Media Radiation*: Este modelo permite simular el intercambio de la radiación térmica contando con que el medio que llena el espacio entre las



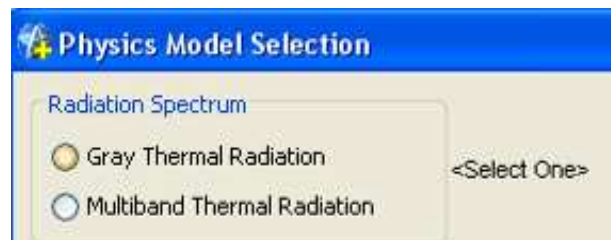
superficies si participa, es decir, que puede absorber, emitir y/o dispersar la radiación.



*Figura 38. Opciones Radiation*

*Radiation Spectrum* (Figura 39)

- *Gray Thermal Radiation*: Este modelo permite simular la radiación difusa independientemente de la longitud de onda de la radiación. Con este modelo, las propiedades de los medios de radiación y las superficies circundantes se consideran la misma para todas las longitudes de onda.
- *Multiband Thermal Radiation*: Este modelo permite simular la radiación difusa, que depende de la longitud de onda o frecuencia. Con este modelo, las propiedades de los medios de radiación y las superficies circundantes pueden ser especificadas por la banda de longitud de onda. El número y las extensiones de las bandas pueden ser elegidos para describir las variaciones de propiedad con respecto a la longitud de onda.



*Figura 39. Opciones Radiation Spectrum*

### Solar Radiation (Figura 40)

El programa nos permite simular con radiación solar. Para ello debemos activar la opción *SolarLoads* dentro del panel *Physics Model Selection* una vez activada la opción *Surface-to-Surface Radiation*. Este modelo se utiliza para modelar las cargas de la radiación del sol. Debemos definir los siguientes parámetros:

- *Altitude Angle*: Establece la componente vertical o de elevación del vector de dirección solar.
- *Azimuth Angle*: Define la componente horizontal del vector de dirección solar.
- *Diffuse Solar Flux*: Establece la energía radiante solar de los alrededores del medio ambiente.
- *Direct Solar Flux*: Define la energía solar radiante procedente directamente del sol a lo largo del vector de dirección especificada.
- *Coordinate System*: Especifica el sistema de coordenadas (laboratorio por defecto). La lista desplegable de esta propiedad incluye los sistemas de coordenadas locales que existen en la simulación.



Figura 40. Opciones Solar Radiation

## 5. Condiciones físicas del entorno

Según el campo que quiero estudiar habrá que definir unas condiciones físicas u otras, para el estudio del comportamiento térmico de un modelo, tendré que definir:

- *Gray Thermal Radiation*: Me sitúo en la carpeta *Continua*, subcarpeta *Models*, opción *Gray Thermal Radiation*, colocaré la temperatura de radiación del ambiente véase figura 41.

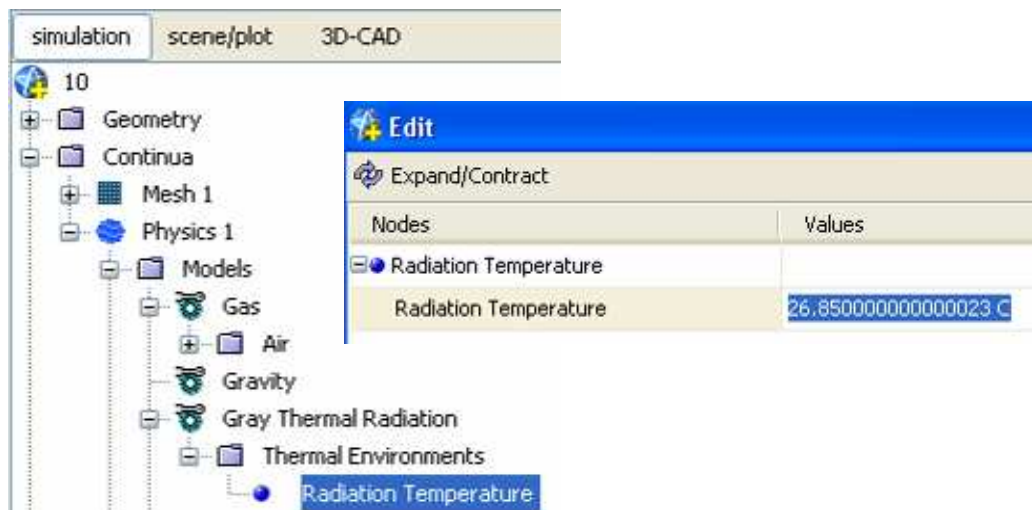


Figura 41. Condición Física Gray Thermal Radiation

- *Solar Loads*: Me sitúo en la carpeta *Continua*, subcarpeta *Models*, opción *Solar Loads*, definiré los datos de *Azimuth Angle*, *Altitude Angle*, *Direct Solar Flux* y *Diffuse Solar Flux*, véase figura 42.



Figura 42. Solar Loads

- *Thermal Specification*: Me sitúo en la carpeta *Regions*, subcarpeta *Body-Boundaries*, elijo el cuerpo al que quiero cambiar la condición física, pulso subcarpeta *Physics Conditions*, selecciono *Thermal Specification*, esta opción la definiré como *convection*, véase figura 43.

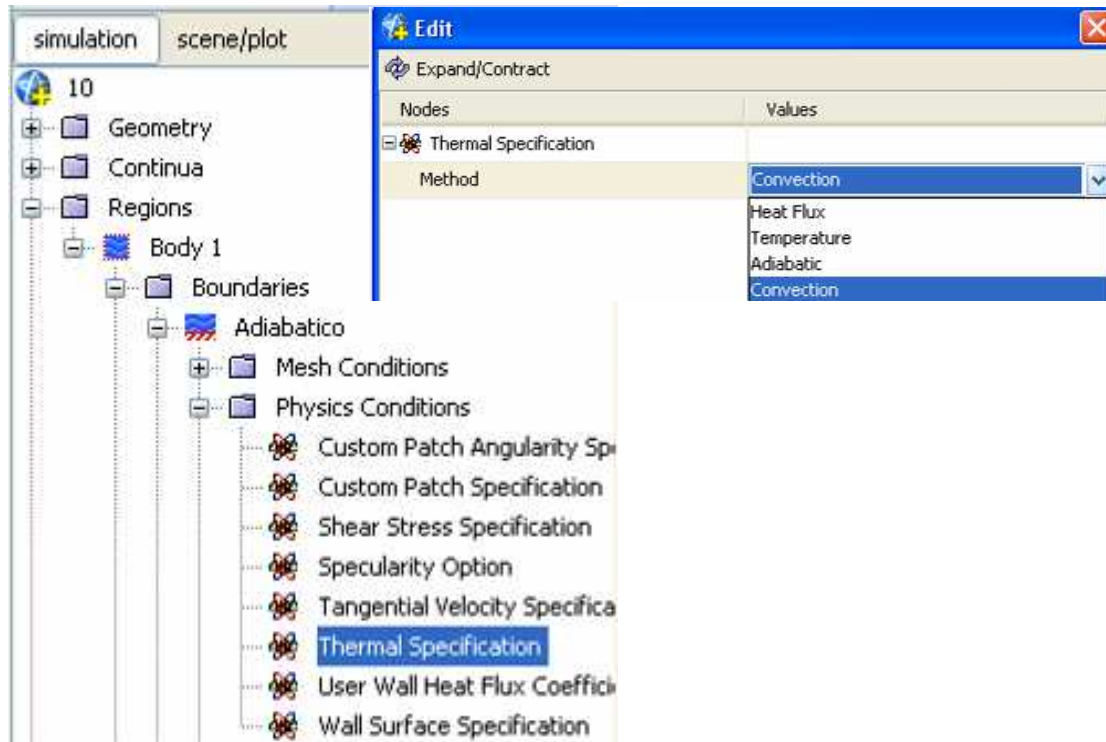


Figura 43. Thermal Specification

En el caso de estudio térmico por radiación solar de un modelo selecciono la opción de convección, pero repito que este software informático tiene más opciones y en cada una de ellas seleccionar la que le corresponda.

En este mismo apartado *Thermal Specification* para definir la temperatura de un cuerpo seleccionar la opción *Temperature* y para definir el flujo de calor de la opción *Heat Flux*.

Otras condiciones físicas que el software nos da la opción de introducir son:

- Presión: Entrada o salida de aire

Para definir las condiciones físicas de presión me sitúo en la pestaña *Regions*, subcarpeta *Body - Boundary* y selecciono *Pressure Inlet* o *Pressure Outlet*, véase figura 44.

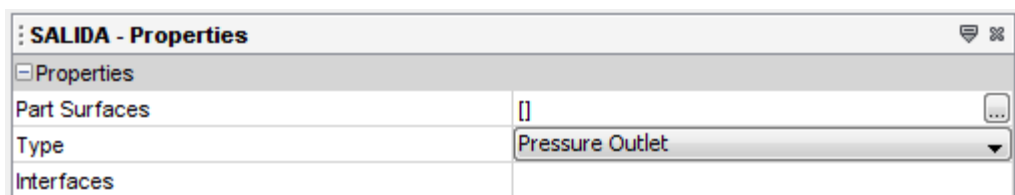


Figura 44. Definición de presión

Una vez he seleccionado lo anterior, en la subcarpeta *Mesh Conditions*, desactivo *Custom Surface Size*, véase figura 45, eliminándose la subcarpeta *Mesh Values*. Colocaré mi dato de temperatura del aire en la subcarpeta *Physics Values*, véase figura 46.

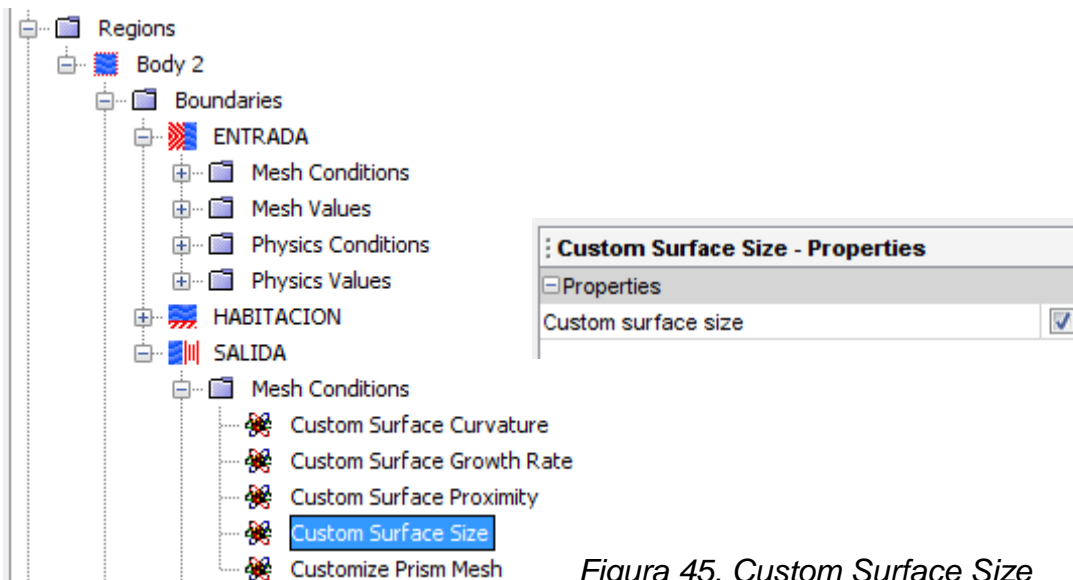


Figura 45. Custom Surface Size

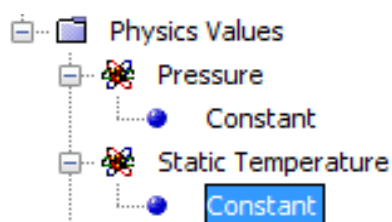
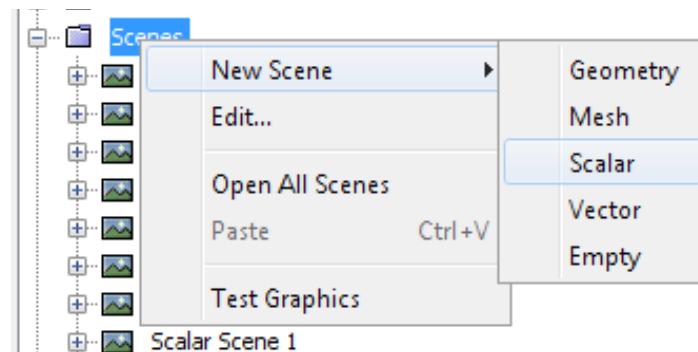


Figura 46. Physics Values

## 6. Escenas de visualización de resultados

Crearé una nueva escena pulsando el botón derecho sobre la carpeta *Scene* y creando una nueva escena escalar, como se observa en la figura 47. Se habrá creado un nuevo archivo de escena.

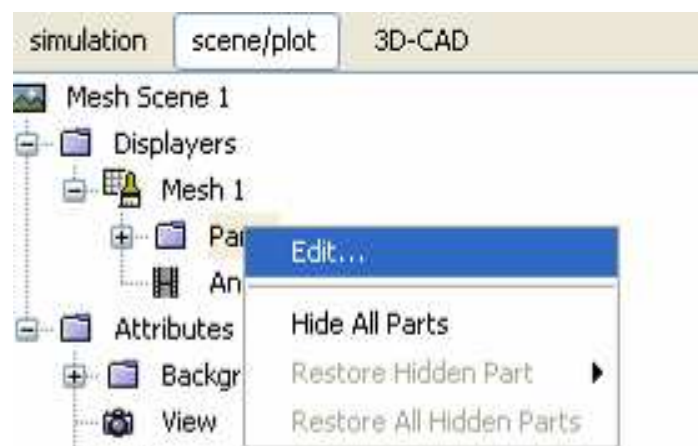


*Figura 47. Nueva escena escalar*

A continuación puedo crear planos de corte de visualización, parte del cuerpo o el cuerpo completo.

Para visualizar el cuerpo completo o por partes

Me sitúo en la pestaña *Scene/plot*, subcarpeta *Displayers-Mesh 1*, y pulso *Parts* con botón derecho, y selecciono *Edit*, como se observa en la figura 48.



*Figura 48. Edición Parts*

A continuación emergerá una ventana como se observa en la figura 49, en la cual selecciono las partes que quiero visualizar en la escena creada anteriormente, si cojo todas las partes, observare el modelo completo en la escena. Una vez seleccionadas las partes pulso OK.

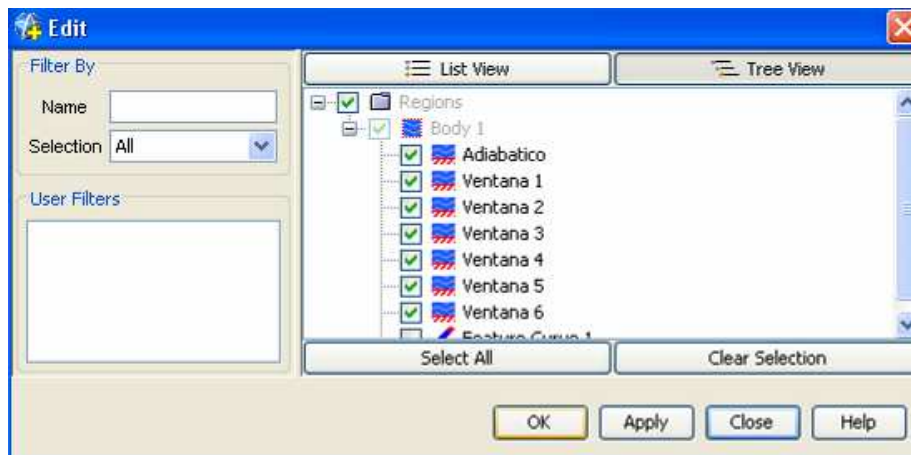


Figura 49. Elección de partes del modelo

#### Para crear un plano de corte de visualización

Arrastraré el plano de sección creado anteriormente a mi escena escalar.

Para crear un plano de corte de visualización me situó en la pestaña *Derived Parts* y selecciono *New Part – Section – Plane*, como se observa en la figura 50.

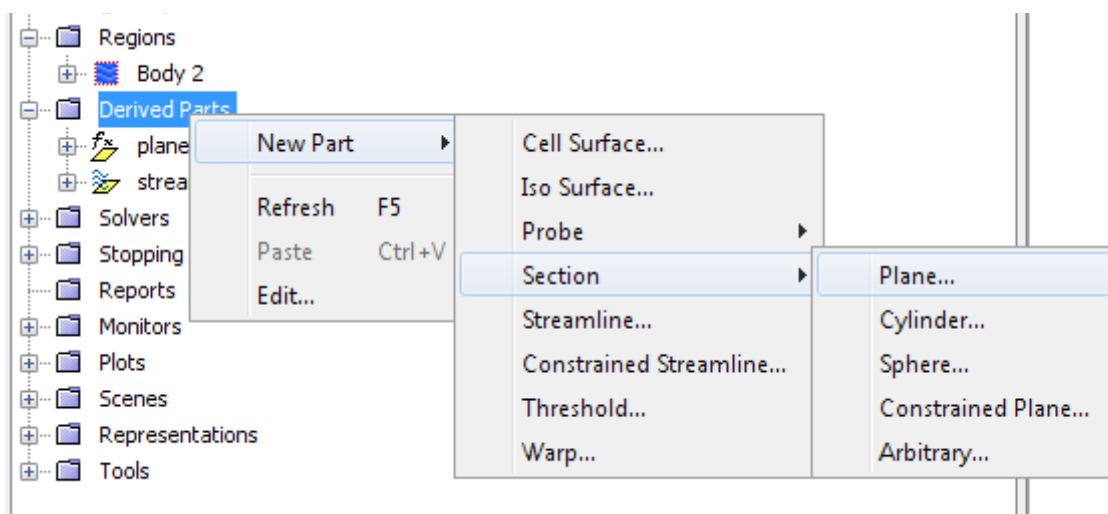
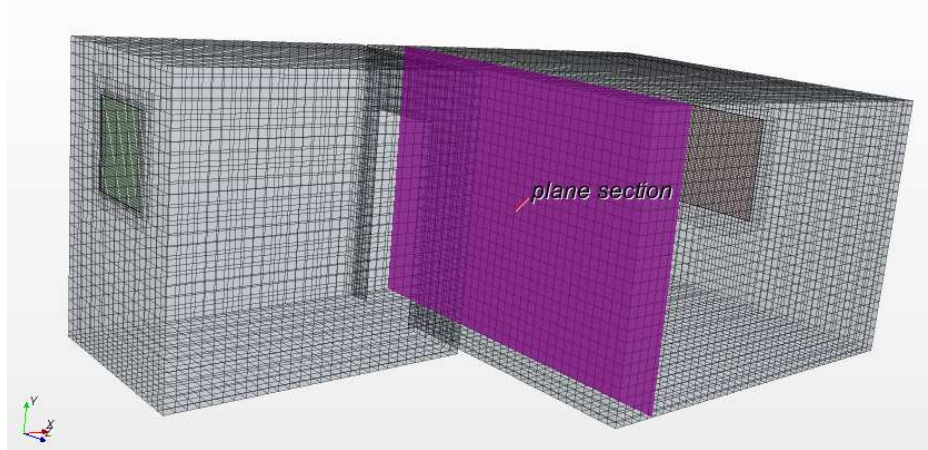


Figura 50. Crear un plano de visualización

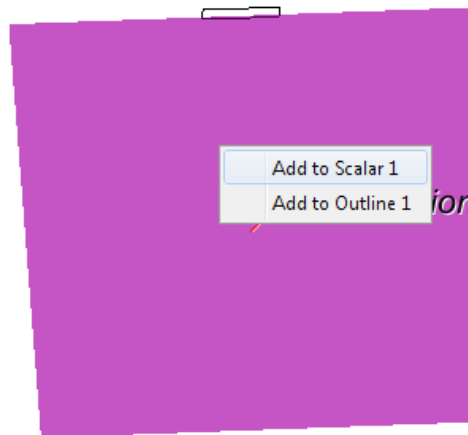


A continuación crearé tantos planos como desee, en la dirección mas adecuada, como se observa en la figura 51.



*Figura 51. Plano de corte de visualización*

Una vez creados los planos los arrastraré uno a uno desde la carpeta *Derivets Parts- Plane*, a la escena creada anteriormente, seleccionare la opción *Add Scalar*, como se observa en al figura 52.



*Figura 52. Plano de corte de visualización en una escena escalar*



El cálculo de resultados podrá ser más o menos preciso según el número de interacciones con el que trabaje.

Para cambiar el numero de interacciones me sitúo en la pestaña *Simulation*, carpeta *Stopping Criteria* y selecciono *Maximum Steps*, como se observa en la figura 53, emergerá un menú de edición en el cual podré cambiar el número de interacciones en el apartado de *Maximun Steps*, como se observa en la figura 54.

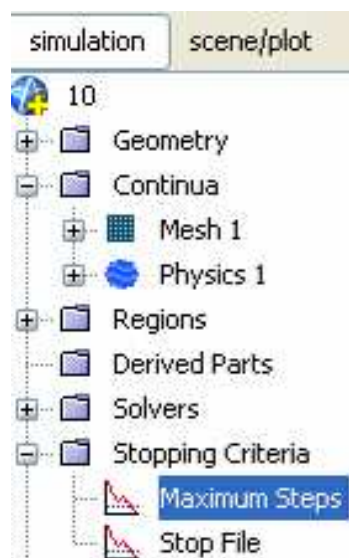


Figura 53. Maximum Steps

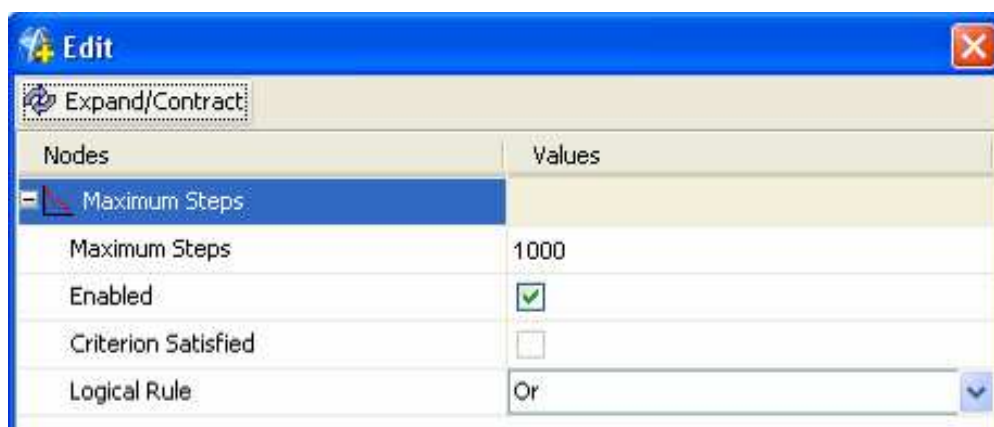


Figura 54. Edición de Maximum Steps

A continuación pulsaré el icono de *Run*, el cual se observa en la figura 55, el programa comenzará a calcular los resultados de la simulación realizada, emergerá la grafica de residuos una vez iniciada la simulación, como se observa en la figura y. La grafica de residuos me ayuda a ver si el número de interacciones elegido es adecuado o no, será el adecuado cuando la grafica se estabilice, la simulación será adecuada si los valores se estabilizan y el error con el que convergen queda definido por debajo del valor  $10^{-1}$ , este es el caso de la figura 56.



Figura 55. Icono Run

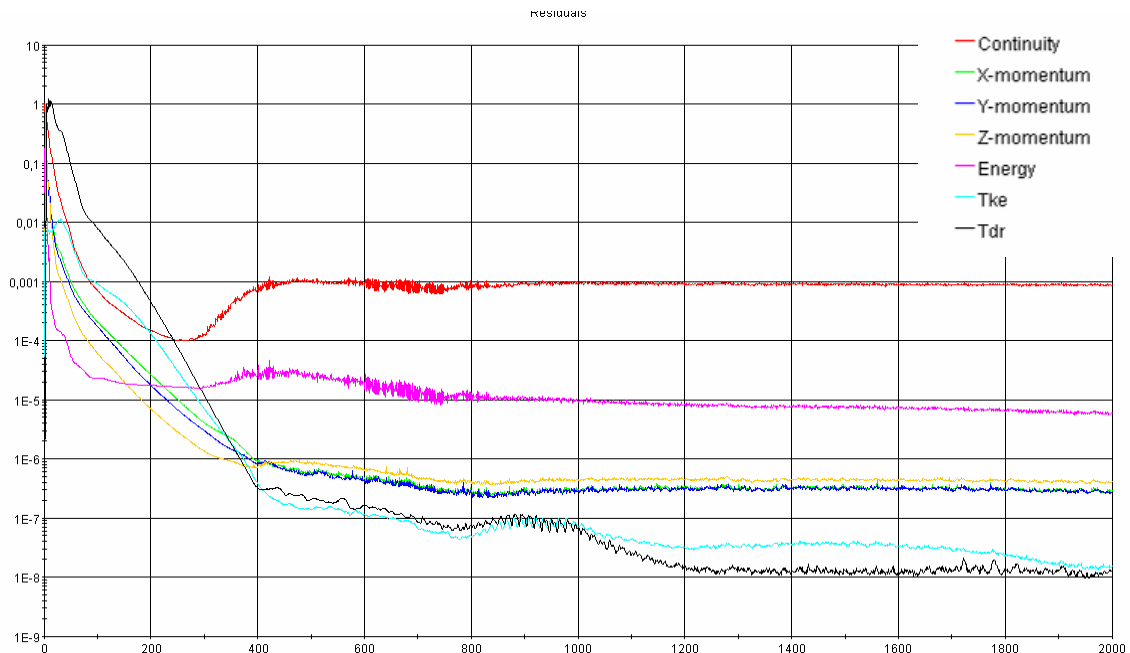


Figura 56. Gráfica de Residuos

Tras el calculo de resultados, se vuelve a la escena creada y sobre la barra de *Select Function* pulso con botón derecho y selecciono el resultado que quiero observar, como se muestra en la figura 57.

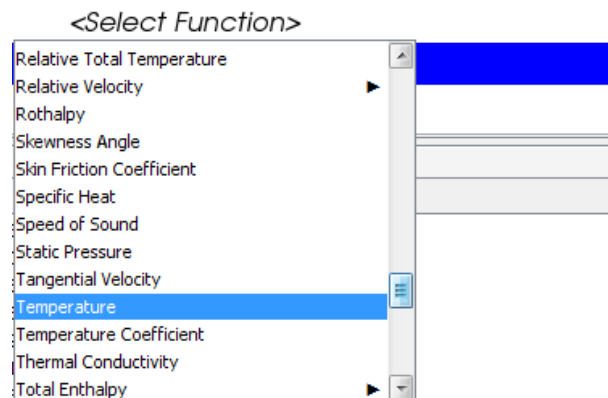


Figura 57. Selección de resultado

Existen varias formas de visualización de resultados, se puede suavizar la imagen creada, como se observa en la figura 58, me sitúo en *Scene/plot*, en la pestaña *Scalar 1* y selecciono en *Contour Style* la opción *Smooth Filled*.

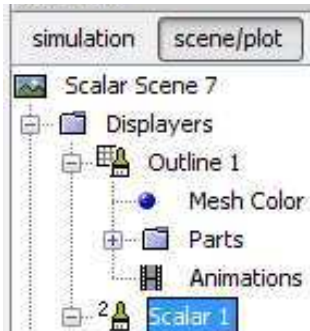
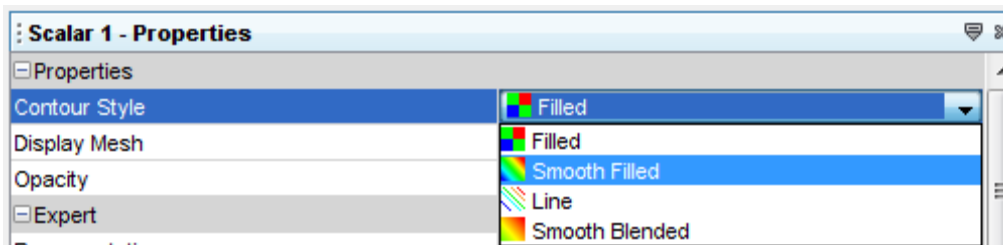


Figura 58. Countour Style



También se puede cambiar las unidades, como se observa en la figura 59, por ejemplo de  $^{\circ}\text{K}$  a  $^{\circ}\text{C}$  me sitúo en *Scene/plot*, en la pestaña *Scalar 1 – Scalar Field* y selecciono en *Units* las unidades deseadas.

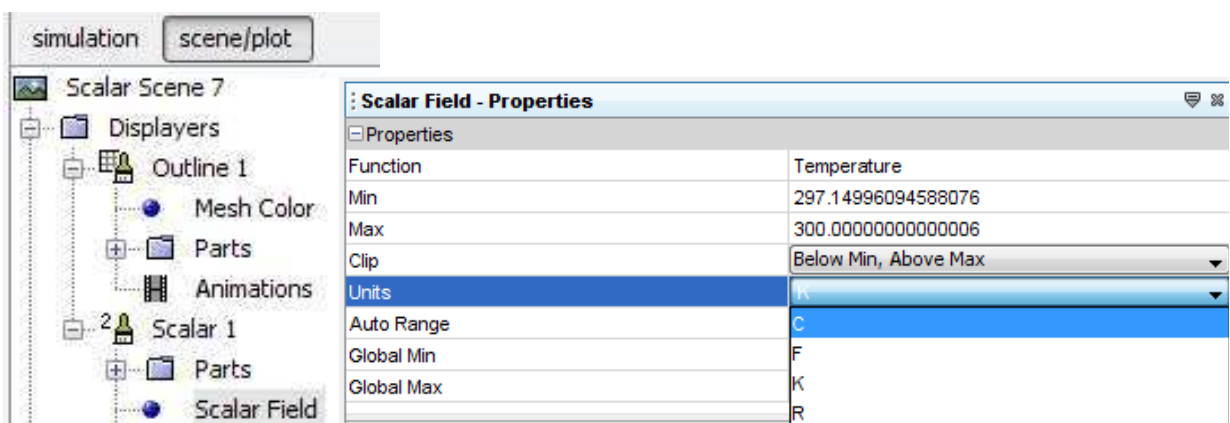


Figura 59. Cambio de unidades

## 7. Introducción de nueva formulación de cálculo

Una de las opciones que presenta el programa es la de introducir nuevas formulas para el análisis del modelo. Me sitúo en la pestaña *Tools* y selecciono la subcarpeta *Field Functions*, botón derecho para crear una nueva formulación, como se observa en la figura 60.

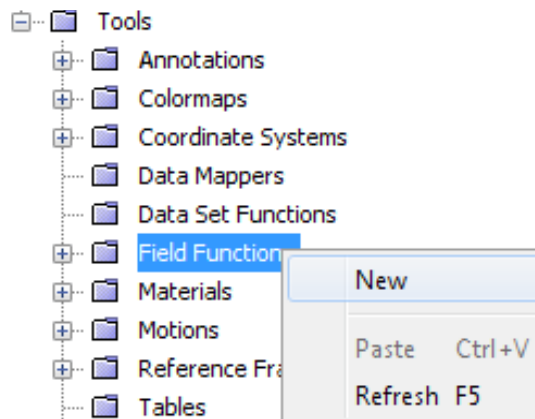


Figura 60. Introducir nueva fórmula en el programa

Nos aparecerá un nuevo archivo *User Field Function 1*, como se observa en la figura 61, al que cambiaré su nombre y escribiré su código en la ventana de propiedades en *Definition*. Una vez que tengo instalada la fórmula en el programa, selecciono con el botón derecho *Select Function* en mi escena escalar y busco el nombre de la fórmula introducida, la selecciono y se representara en la escena.

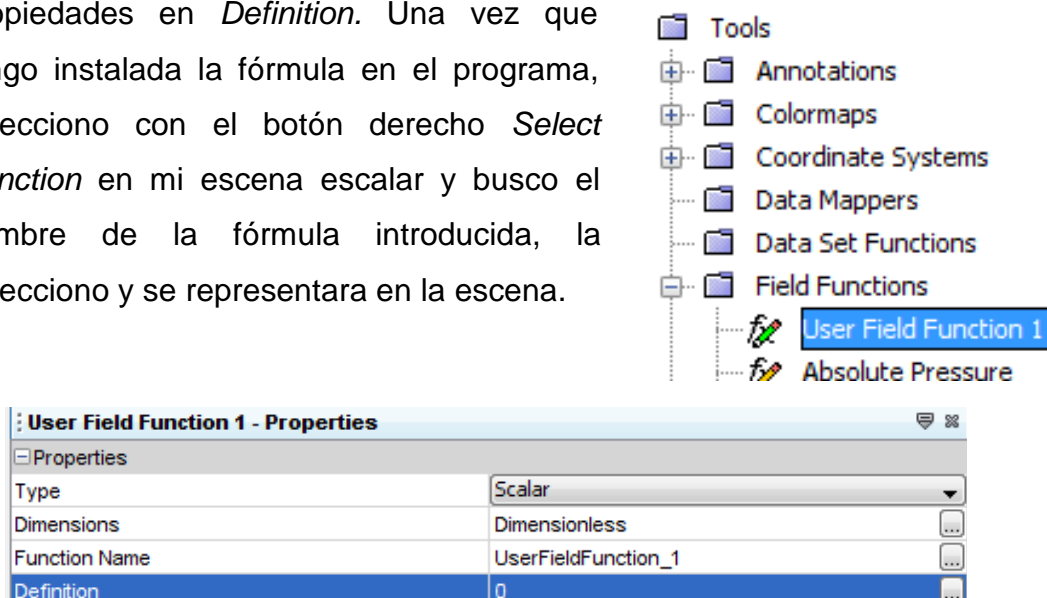


Figura 61. User Field Function

### 6.3. APLICACIÓN DEL SOFTWARE A UN MODELO

El modelo escogido para realizar la simulación con el programa STAR CCM+ se trata de un aula de clase, véase figura 62, que pertenece a la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid, véase figura 63 para observar la ubicación de la misma.



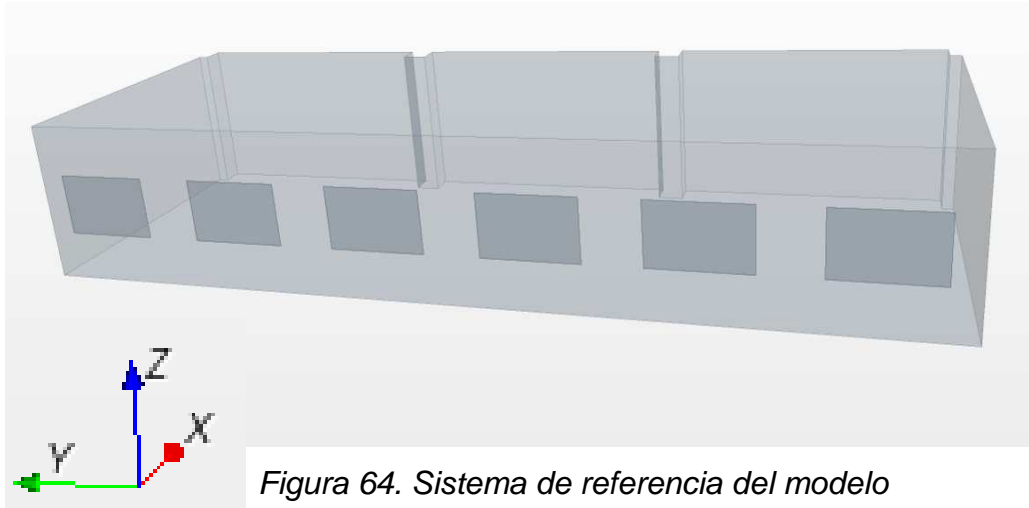
*Figura 62. Modelo*



*Figura 63. Ubicación del modelo*



El sistema de referencia elegido tiene el eje X según la dirección S-N, el eje Y en la dirección E-W y, finalmente, el eje Z corresponde a la dirección vertical, véase en la figura 64.



*Figura 64. Sistema de referencia del modelo*

La simulación se ha realizado tomando las medidas reales del aula de clase que he escogido como modelo, exceptuando las dimensiones de las ventanas, las cuales poseen un metro menos de altura, ya que la persiana del aula no llega hasta la parte superior de la ventana como se observa en la figura 65.



*Figura 65. Defecto de ventanas del modelo*

En la figura 66 se observa la planta acotada del modelo elegido para realizar la simulación con el software informático, mientras que en la figura 67 vemos el alzado de una de las ventanas acotado.

La altura del aula es de 3,3 metros, dato necesario para la extrusión del modelo.

Con estos datos dibujo el aula en el software.

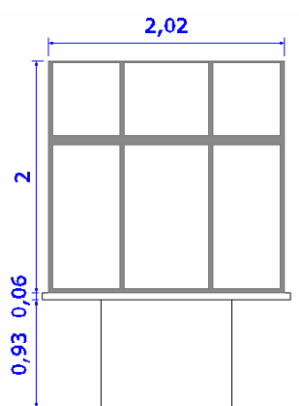


Figura 67. Alzado ventana

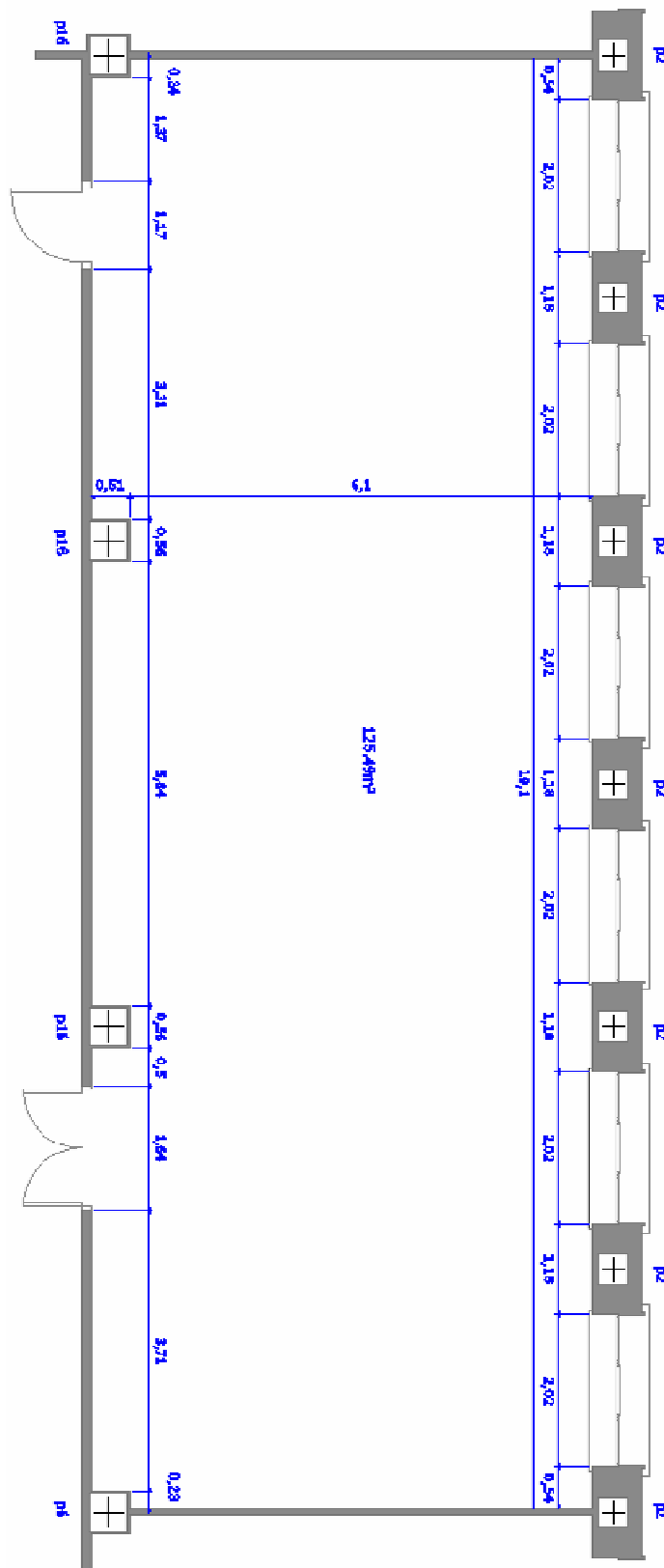
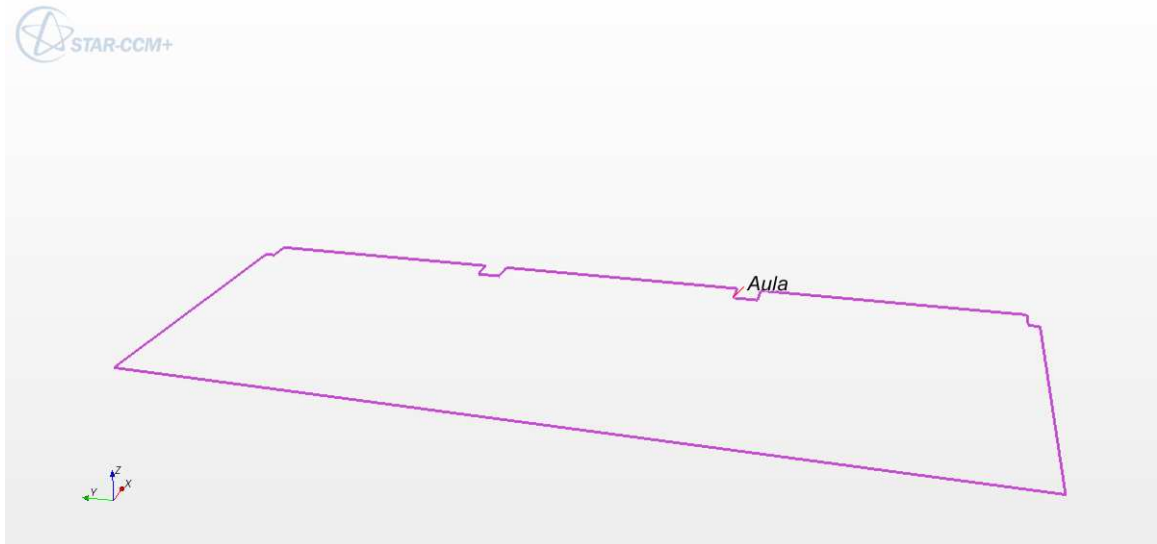


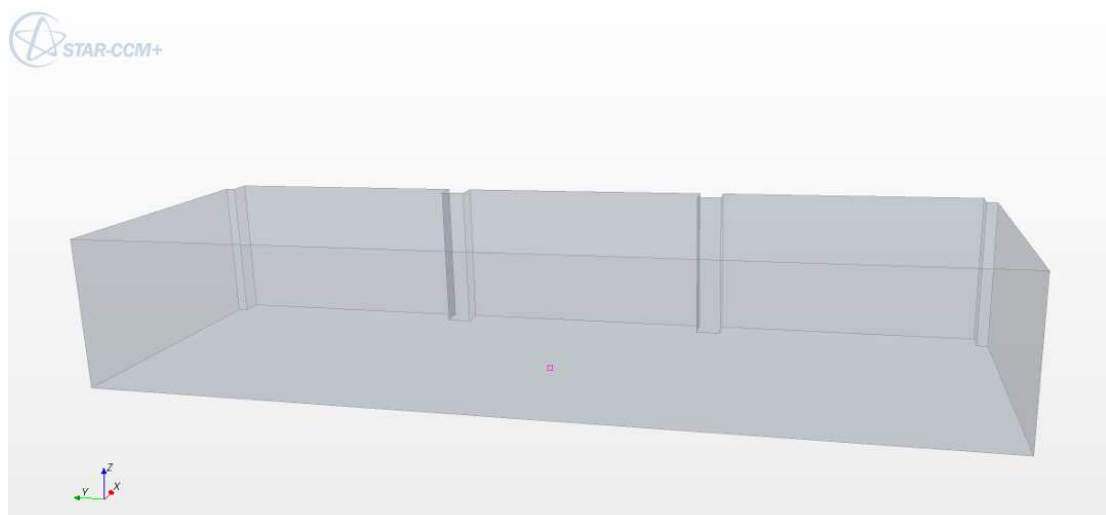
Figura 66. Planta del modelo

Para realizar la simulación he abierto un archivo nuevo y he diseñado su planta en el plano XY, como se observa en la figura 68.



*Figura 68. Planta del modelo*

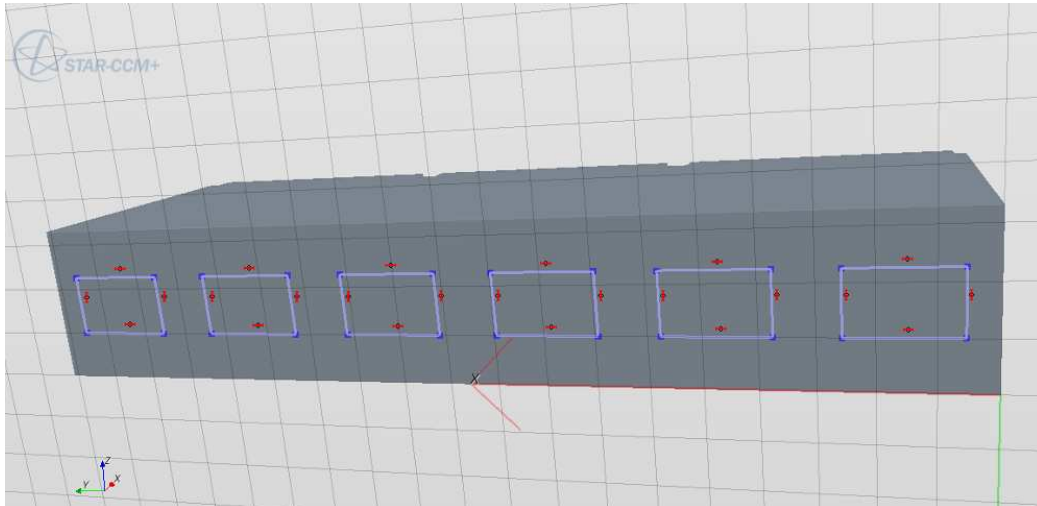
Una vez dibujada la planta en 2D procedo a darle altura. La altura del modelo es de 3,3 m. En la figura 69 se muestra el modelo extruido.



*Figura 69. Modelo en 3D*



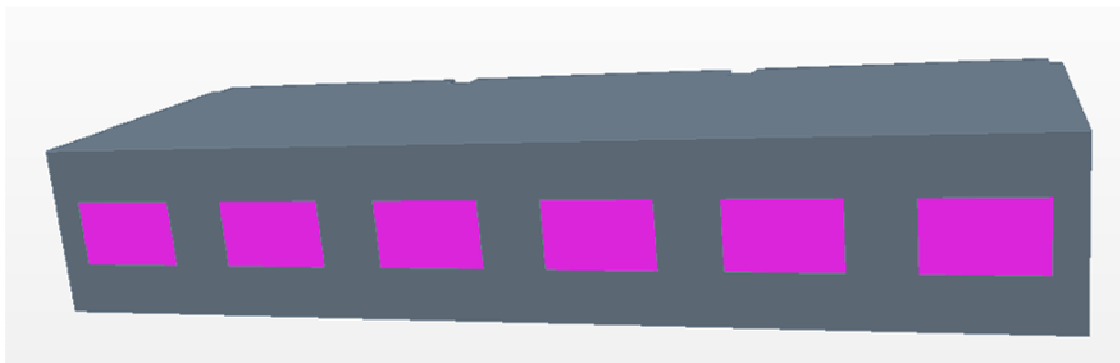
Una vez que se tiene el modelo en extrusionado, dibujo las ventanas en su plano correspondiente, véase figura 70.



*Figura 70. Modelado de ventanas en el plano*

El siguiente paso es extruir las ventanas del modelo, el proceso es el mismo que al extruir la planta con la diferencia de seleccionar la pestaña *Imprint* en *Body Interaction* en lugar de *None*, de esta manera el programa diferencia la zona de contacto de los cuerpos del resto del cuerpo. La altura de extrusión de las ventanas es de 0,01 metros ya que no va a ser representativa.

Una vez llegado a este punto, el dibujo del modelo esta totalmente acabado, el resultado se observa en la figura 71.



*Figura 71. Modelo*

Tras haber extruido las ventanas, se cambiarán los nombres de las extrusiones y *Sketch* creados para evitar confusiones más adelante. Antes de exportar el modelo, se unirán todos los *Bodies* que tengo.

Una vez unidos los *Bodies*, se exporta el modelo en un archivo con la extensión *.x\_b*.

Abro de nuevo el programa, nueva simulación, *File – Import surface mesh –* y elijo el archivo exportado y lo abro para trabajar sobre el. En la figura 72 se observa como el archivo en formato *.x\_b* se importa perfectamente.

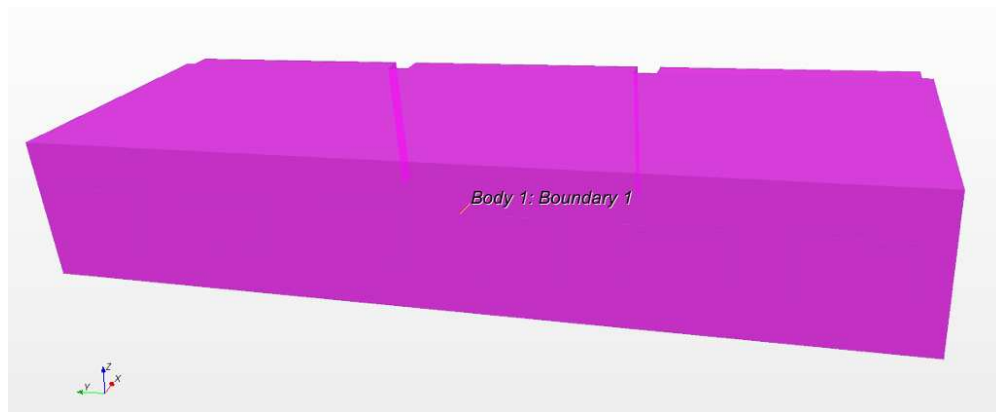


Figura 72. Archivo importado

Para denominar cada cara de nuestro objeto selecciono *Split by patch*.

Una vez pulsado esta opción voy renombrando cada cara de nuestro dibujo como se observa en la figura 73.

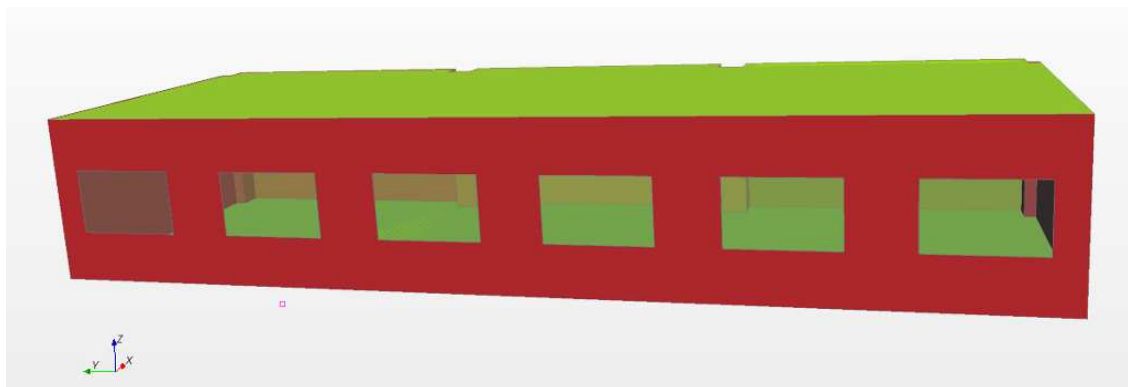
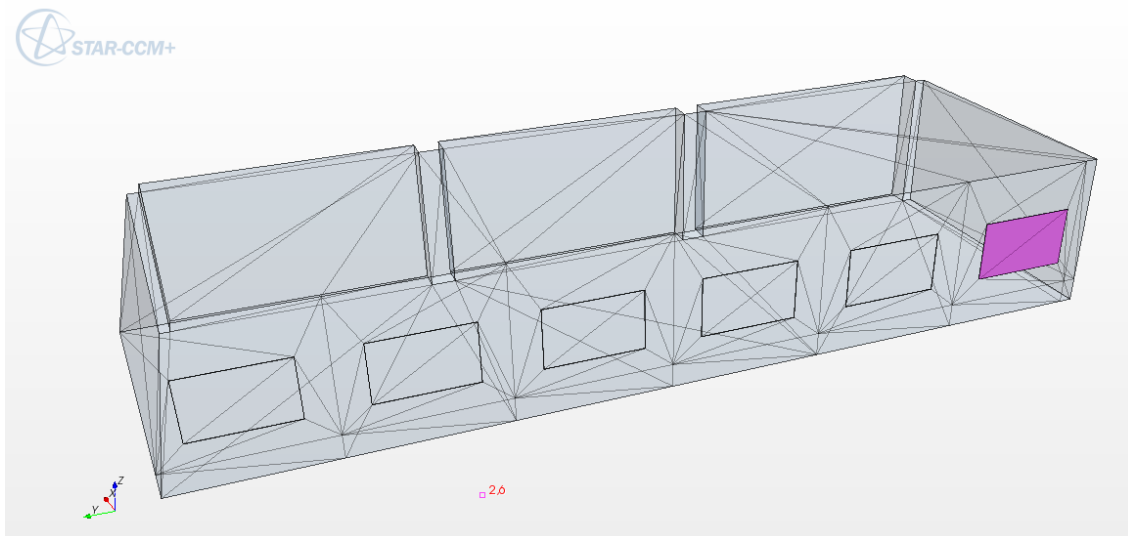


Figura 73. Modelo en menú *Split By Match*

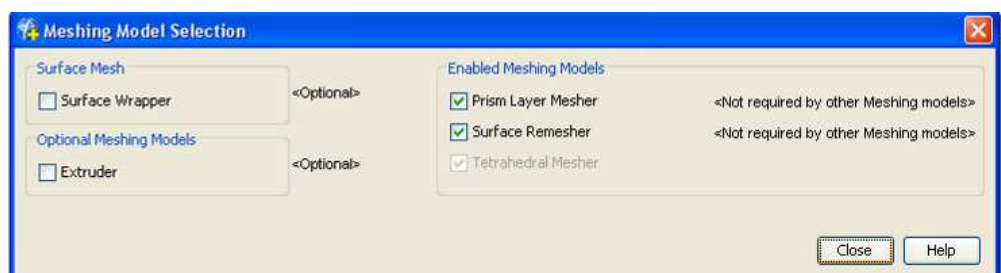
En la figura 74, se observa el modelo antes de mallar.



*Figura 74. Modelo terminada la parte de dibujo antes de mallar*

Las opciones que escojo para realizar el mallado son los siguientes parámetros, como se observa en la figura 75:

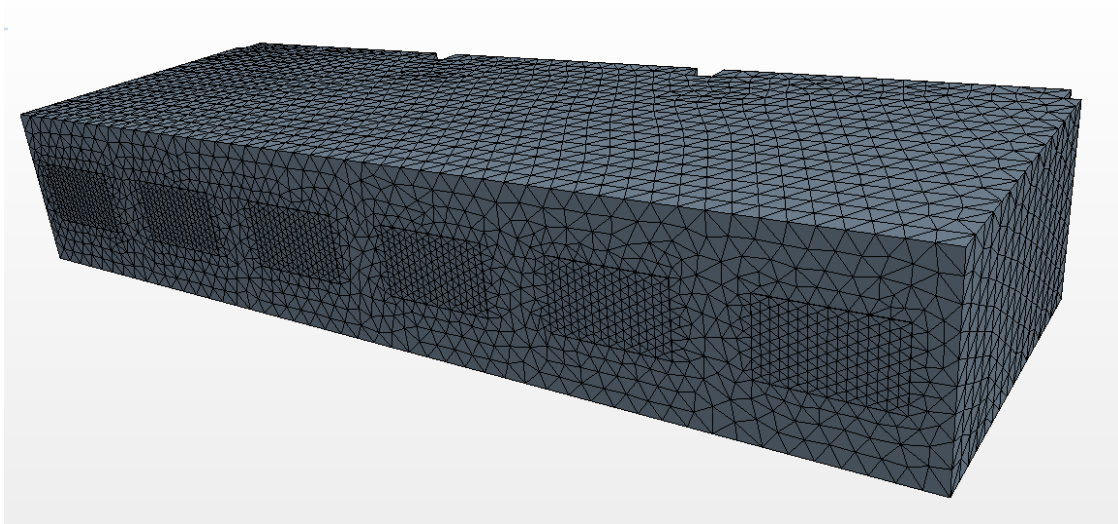
- *Surface Remesher* (mallado de todo el volumen).
- *Tetrahedral Mesher* (determina que el mallado es en forma tetraédrica).
- *Prism Layer Mesher* (capas prismáticas, capa límite; malla con mayor densidad las zonas límites del conjunto).



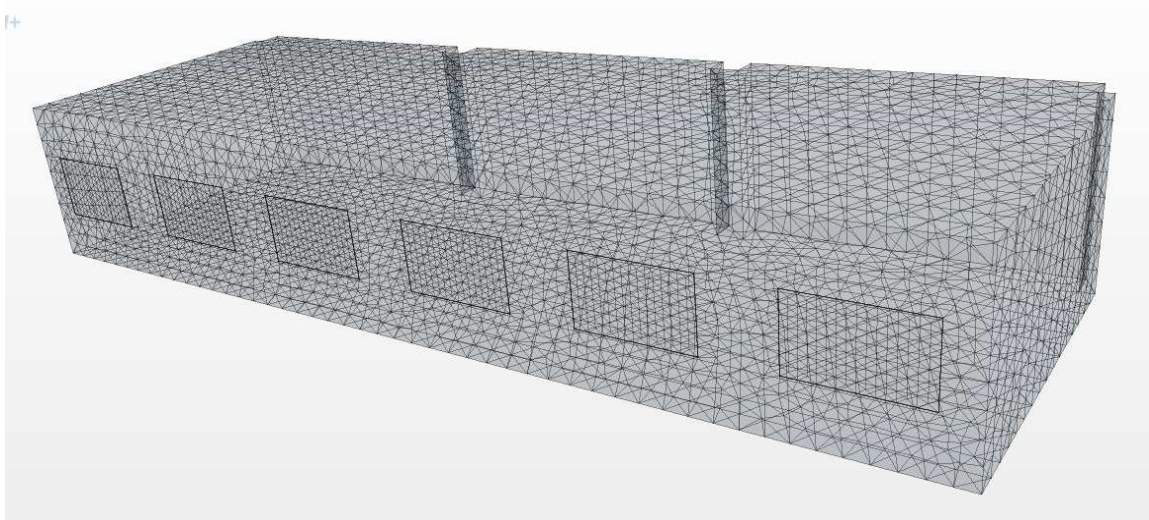
*Figura 75. Modelo de mallado*

Se ha elegido un mallado tetraédrico con el cual queda mejor definido el modelo, y se obtienen unos resultados más exactos en la simulación. A continuación definiré las condiciones de mallado del modelo.

El mallado seleccionado es tetraédrico, con un *Base Size* de 0,4 y una intensificación de mallado en las ventanas de un 25%. Cuanto menor sea el valor de *Base Size* más intenso será el mallado y los resultados serán más precisos, pero es necesario unos ordenadores con una gran capacidad para poder realizar el mallado muy denso en este tipo de modelo, y la licencia del programa impedía el uso del mismo fuera de la Escuela de Arquitectura Técnica de Madrid. En la figura 76 se observa el mallado tetraédrico exterior, y en la figura 77 el modelo interiormente.



*Figura 76. Modelo mallado*



*Figura 77. Interior del modelo mallado*

Las condiciones físicas seleccionadas para la simulación del modelo se observan en la figura 78.

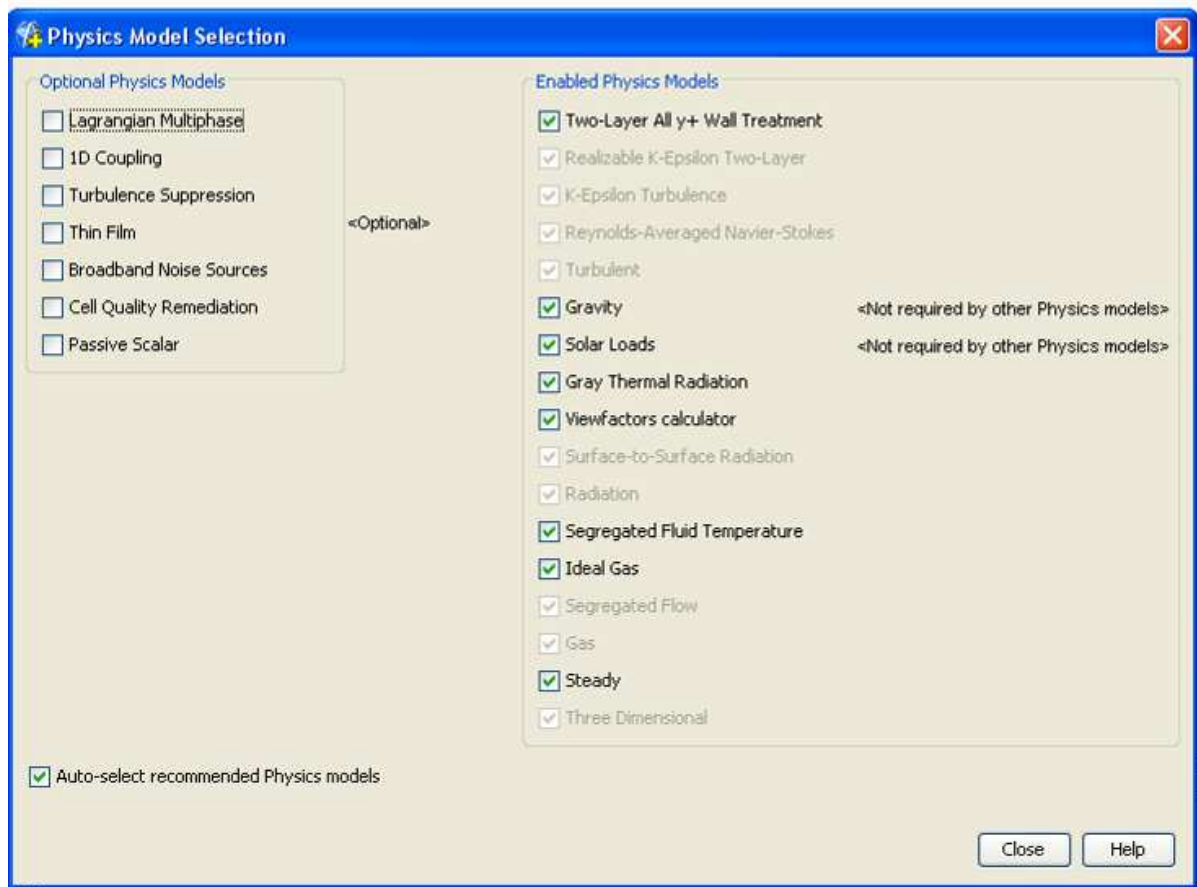


Figura 78. Condiciones físicas seleccionadas

El Star CCM+ considera que la radiación solar entra, en un encerramiento, a través de una superficie acristalada y que solamente absorben calor aquellas superficies interiores que recibe radiación directa. Básicamente el programa lo que hace es calcular los flujos de calor que por radiación, convección y conducción se originan en el proceso resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de la energía. Considera que el flujo de calor en  $\text{W.m}^2$  que gana una pared, por radiación solar, es debido al flujo de calor por radiación solar directa mas al flujo de calor por convección y conducción de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\dot{q}_w = \dot{q}_r + \dot{q}_c + \dot{q}_d \quad (19)$$

Una vez seleccionadas las condiciones físicas, las definiré con datos:

Las condiciones iniciales de la temperatura del ambiente por radiación son de 18 °C. La temperatura inicial del cerramiento es de 12°C, y la de las ventanas de 8°C.

Los datos de radiación solar se han considerado, un azimut 50° y una altitud de 50°, orientando al norte la fachada principal, radiación solar directa de 300 W.m<sup>-2</sup> y una radiación solar difusa de 200 W.m<sup>-2</sup>.

Tanto en las ventanas como en el cerramiento del aula se ha considerado una transferencia de calor por convección.

El coeficiente de emisividad del cerramiento exterior la he considerado con un valor de 0,85 y el de las ventanas de 0,1.

El coeficiente de transmisividad del cerramiento exterior lo he considerado con un valor de 0,15, con una resistencia térmica de 0.05 W<sup>-1</sup> °C m<sup>2</sup>, y valor de transmisividad de las ventanas de 0,9 con una resistencia térmica de 0,63 W<sup>-1</sup> °C m<sup>2</sup>.

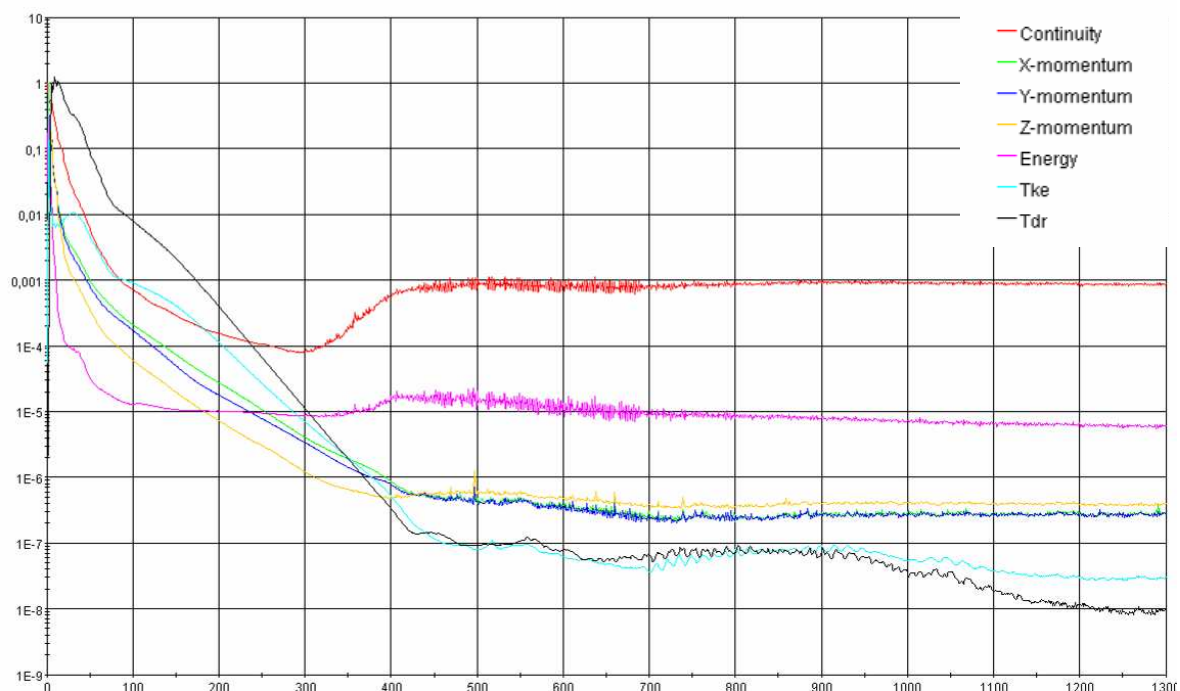
Para finalizar crearé una nueva escena escalar para observar los resultados, en mi caso quiero visualizar el objeto completo.



## 6. RESULTADOS Y OPTIMIZACIÓN

Tras definir todas las condiciones físicas, selecciono el número de interacciones por el que se quiere simular el programa, 1300 iteraciones para la convergencia de las magnitudes físicas que calcula el software.

Una vez iniciada la simulación, emerge la grafica de residuos. Durante el cálculo de las ecuaciones, la gráfica de residuos va cambiando interactivamente. La grafica de residuos me ayuda a ver si el número de interacciones elegido es adecuado o no, como se observa en la figura x, las 1300 interacciones son suficientes ya que se observa como los valores se estabilizan a partir de las 800 interacciones.

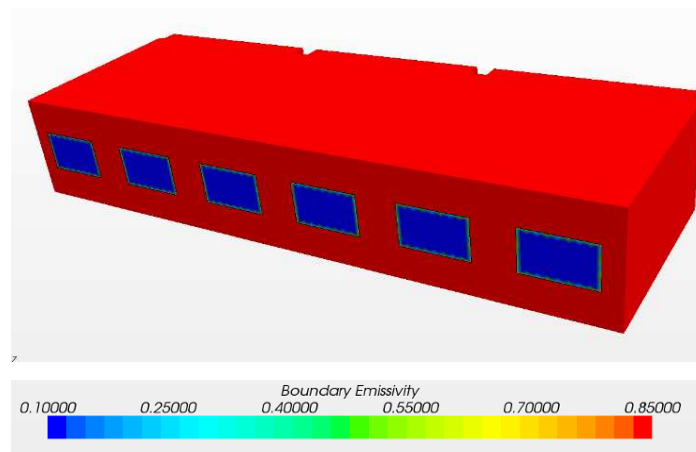


*Figura 79. Gráfica residual del modelo*

En la gráfica de residuos se observa como los valores quedan definidos por debajo de un error de  $10^{-3}$ . Siempre que el error de convergencia de ecuaciones quede definido con valores por debajo de  $10^{-1}$ , el resultado será óptimo, como es este caso.

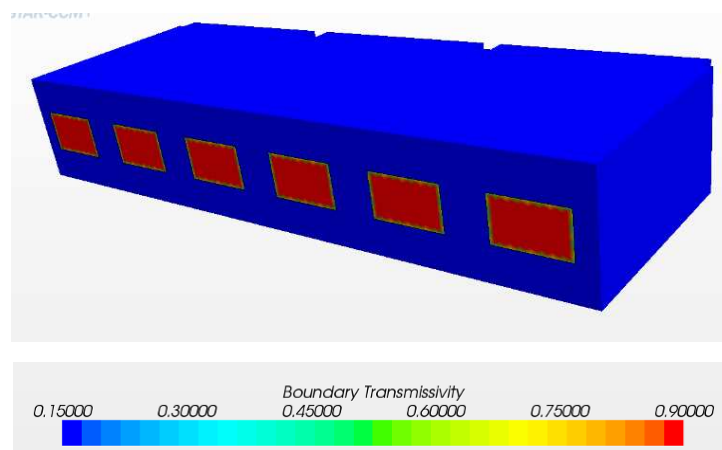
Los valores de radiación directa, radiación difusa y los ángulos solares (azimut y altitud solar) se han escogido para unas condiciones climáticas medias; Mes de abril sobre las 11:00 de la mañana.

El coeficiente de emisividad del cerramiento exterior la he considerado con un valor de 0,85 y el de las ventanas de 0,1, como se muestra en la figura 80.



*Figura 80. Emisividad en el modelo*

El coeficiente de transmisividad del cerramiento exterior la he considerado con un valor de 0,15 y el de las ventanas de 0,9, como se muestra en la figura 81.

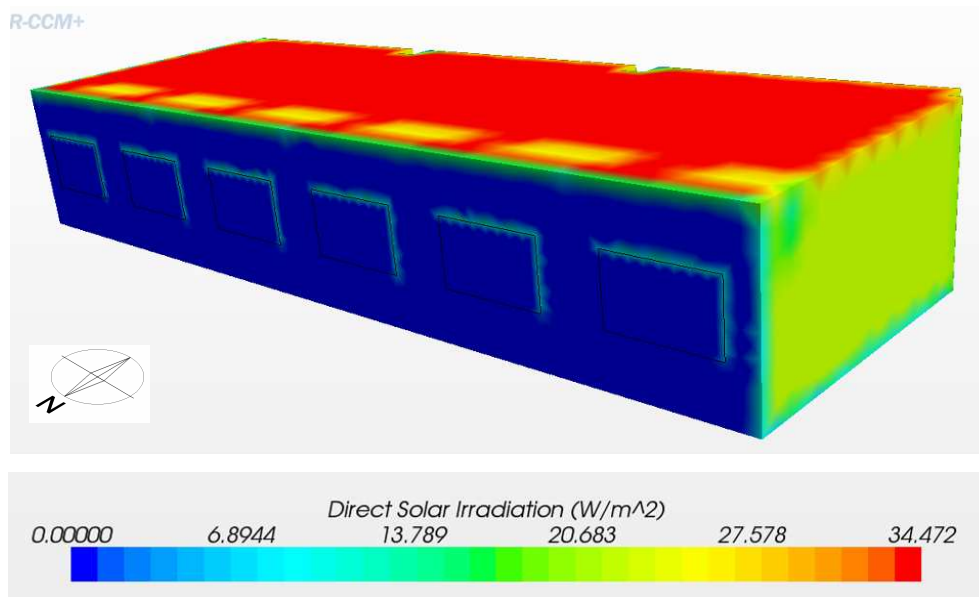


*Figura 81. Transmisividad en el modelo*

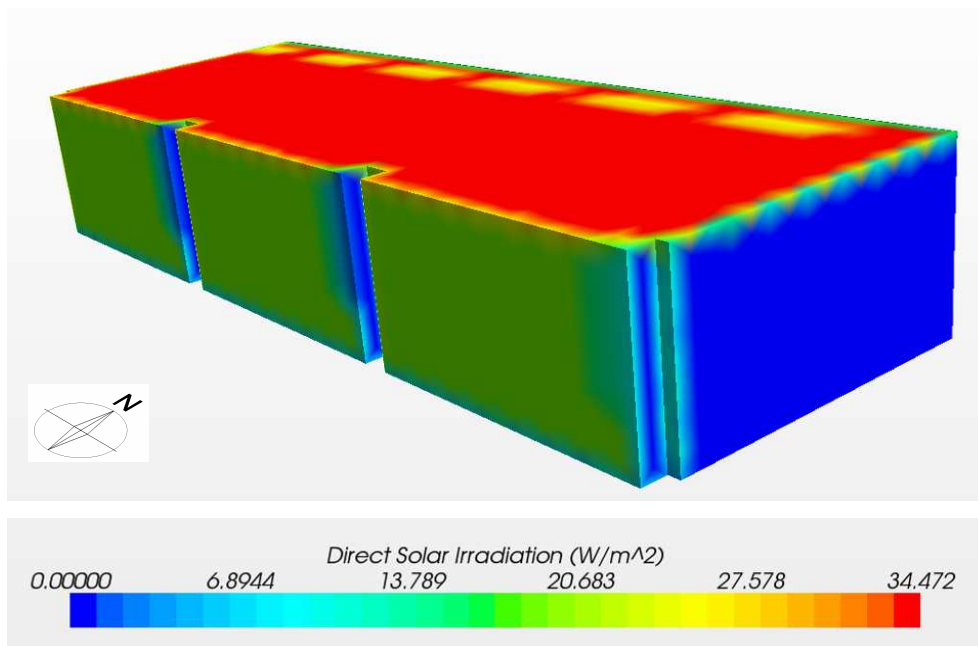


Al estar edificado el modelo escogido, he realizado otra simulación virtual del mismo modelo con la fachada principal orientada al sur, en lugar de al norte, y así observar cual opción habría sido mas adecuada si este estudio se hubiese realizado antes de la edificación del aula. Empezaré analizando los resultados obtenidos con la fachada principal orientada al norte.

En la figura 82 y 83, se muestra la irradiación solar directa en  $\text{W/m}^2$  que desprende el modelo con la fachada principal orientada al norte, es decir, en la orientación que se encuentra realmente el modelo. Las paredes del modelo que más flujo de calor irradian son las que reciben la radiación directa más intensa, se observa como la superficie del techo recibe la mayor radiación, seguida de la pared oeste y sur, que reciben prácticamente la misma cantidad de radiación.

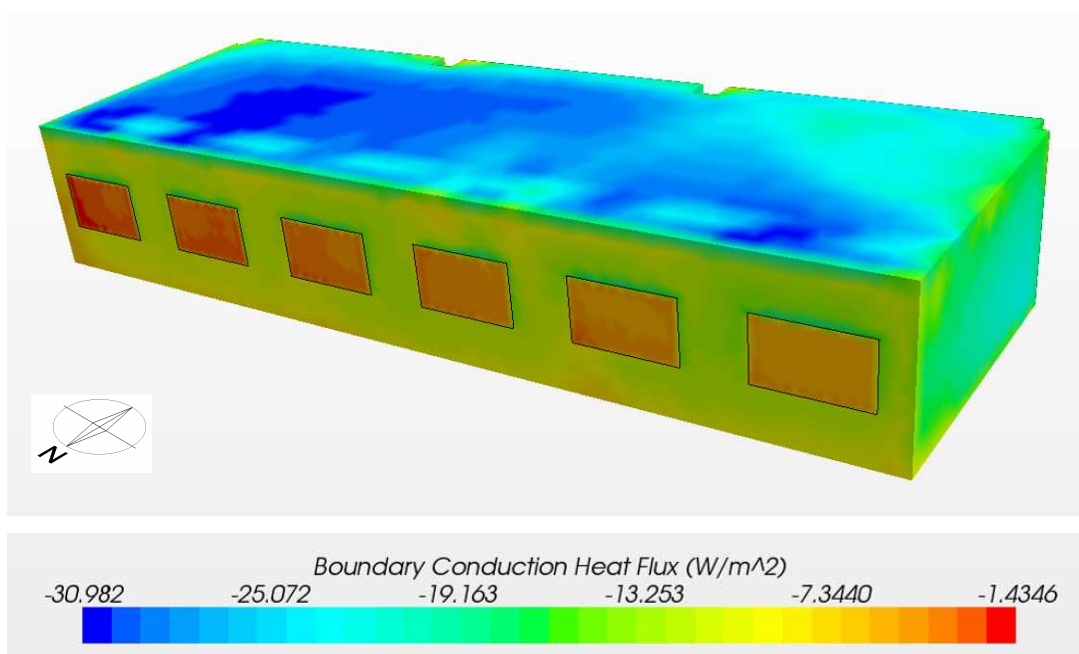


*Figura 82. Irradiación solar directa en las paredes oeste, norte y techo del modelo, con la fachada principal orientada al norte*

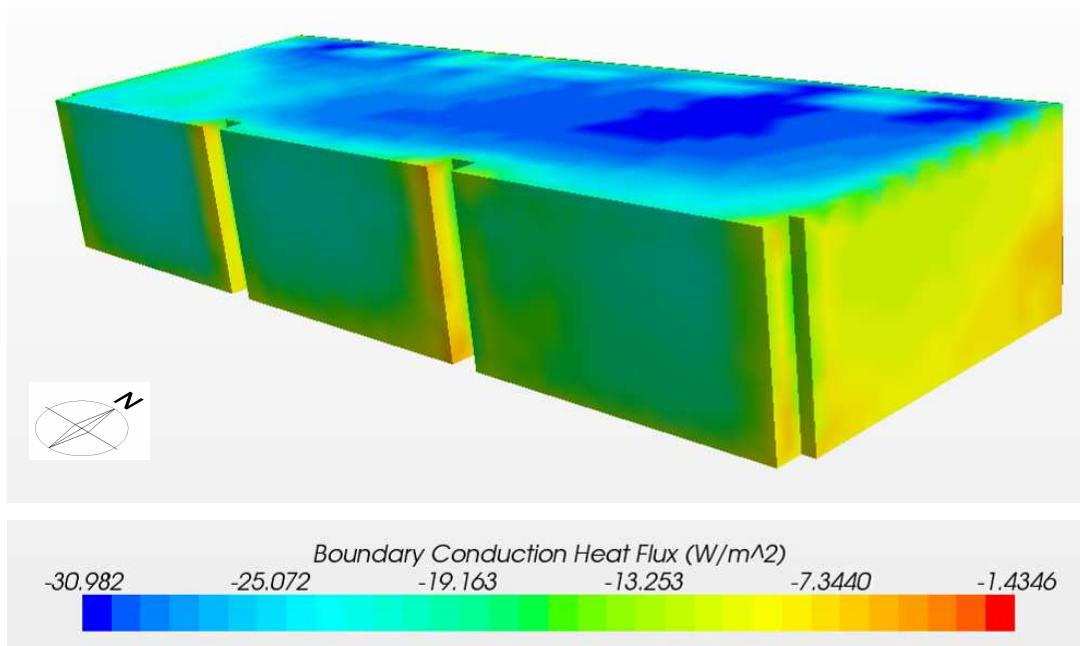


*Figura 83. Irradiación solar directa en las paredes este, sur y el techo del modelo, con la fachada principal orientada al norte*

Las figuras 84 y 85, muestran el flujo de calor por conducción en las paredes y techo del modelo en  $\text{W/m}^2$ . El signo negativo se debe a la dirección del flujo de calor de las superficies del modelo, es decir, el flujo de calor lleva una dirección hacia el exterior, perdiendo calor en su interior.

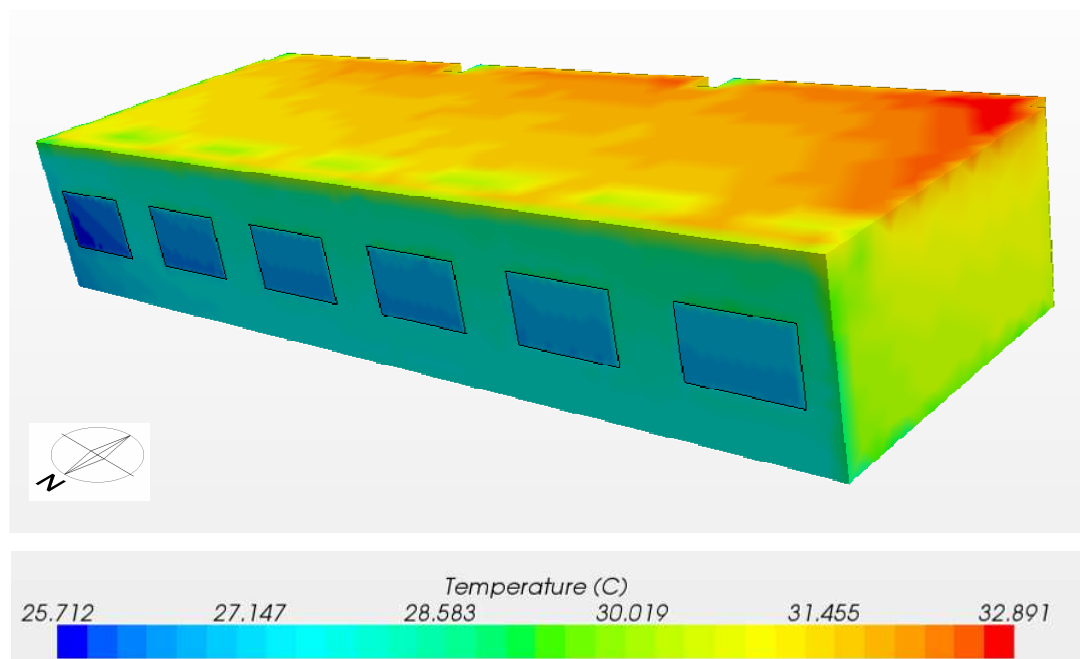


*Figura 84. Flujo de calor por conducción en las paredes norte, oeste y techo del modelo, con la fachada principal orientada al norte*

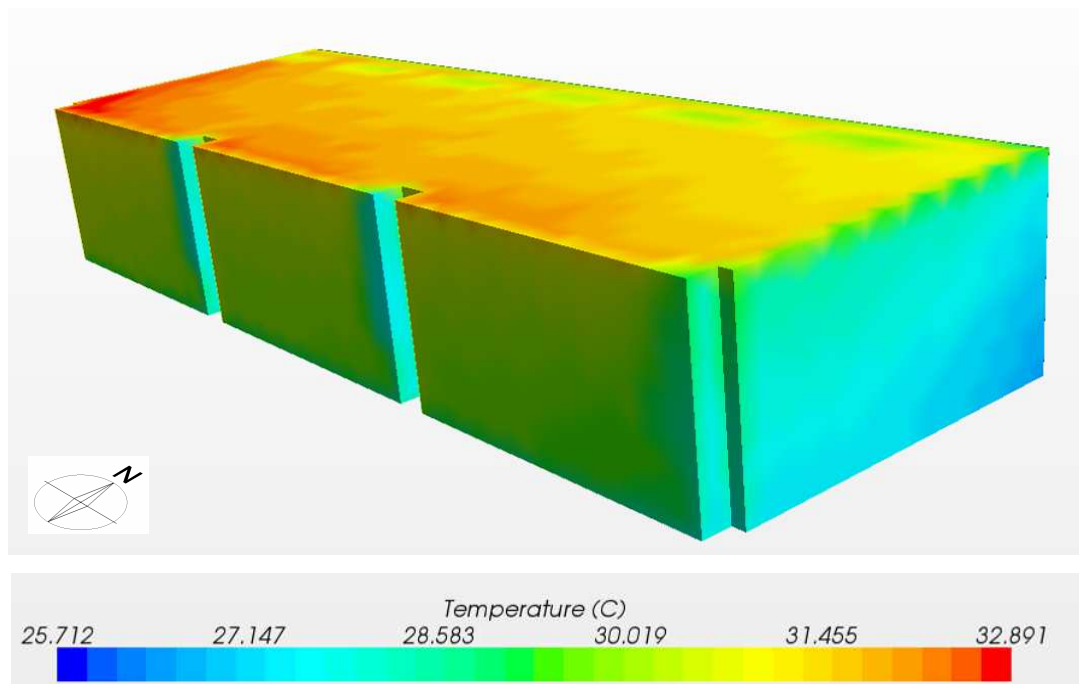


*Figura 85. Flujo de calor por conducción en las paredes este, sur y techo del modelo, con la fachada principal orientada al norte*

En las figuras 86 y 87, se muestra la distribución de la temperatura en todas las superficies de la habitación, después del proceso de transferencia de calor en  $^{\circ}C$ .



*Figura 86. Distribución de temperatura en las paredes oeste, norte y techo del modelo, con la fachada principal orientada al norte*

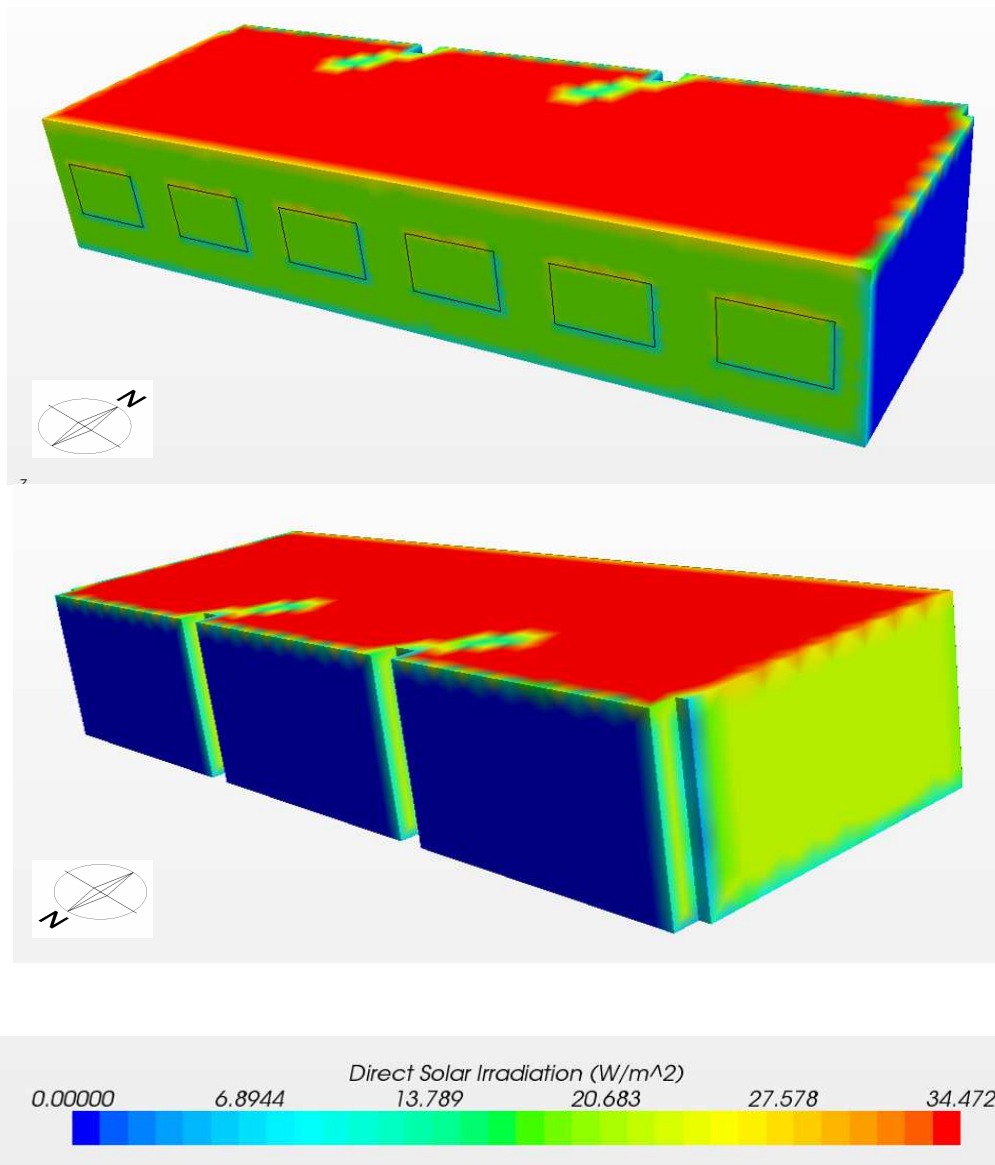


*Figura 87. Distribución de temperatura en las paredes este, sur y techo del modelo, con la fachada principal orientada al norte*

Los resultados indican que las paredes que no reciben radiación solar directa experimentan un aumento de temperatura menor que las que si reciben directamente, este aumento de temperatura respecto a la temperatura inicial se debe a la radiación difusa. Este incremento de temperatura, respecto de la inicial, puede parecer, en principio, muy grande pero hay que tener en cuenta que el modelo se considera herméticamente cerrado, lo significa que no existen filtraciones que permitan la entrada y salida de aire y que puedan influir en el flujo de calor por conducción-convección y, en consecuencia, en la temperatura de las paredes.

A continuación se muestran los resultados obtenidos si la fachada principal tuviese orientación Sur.

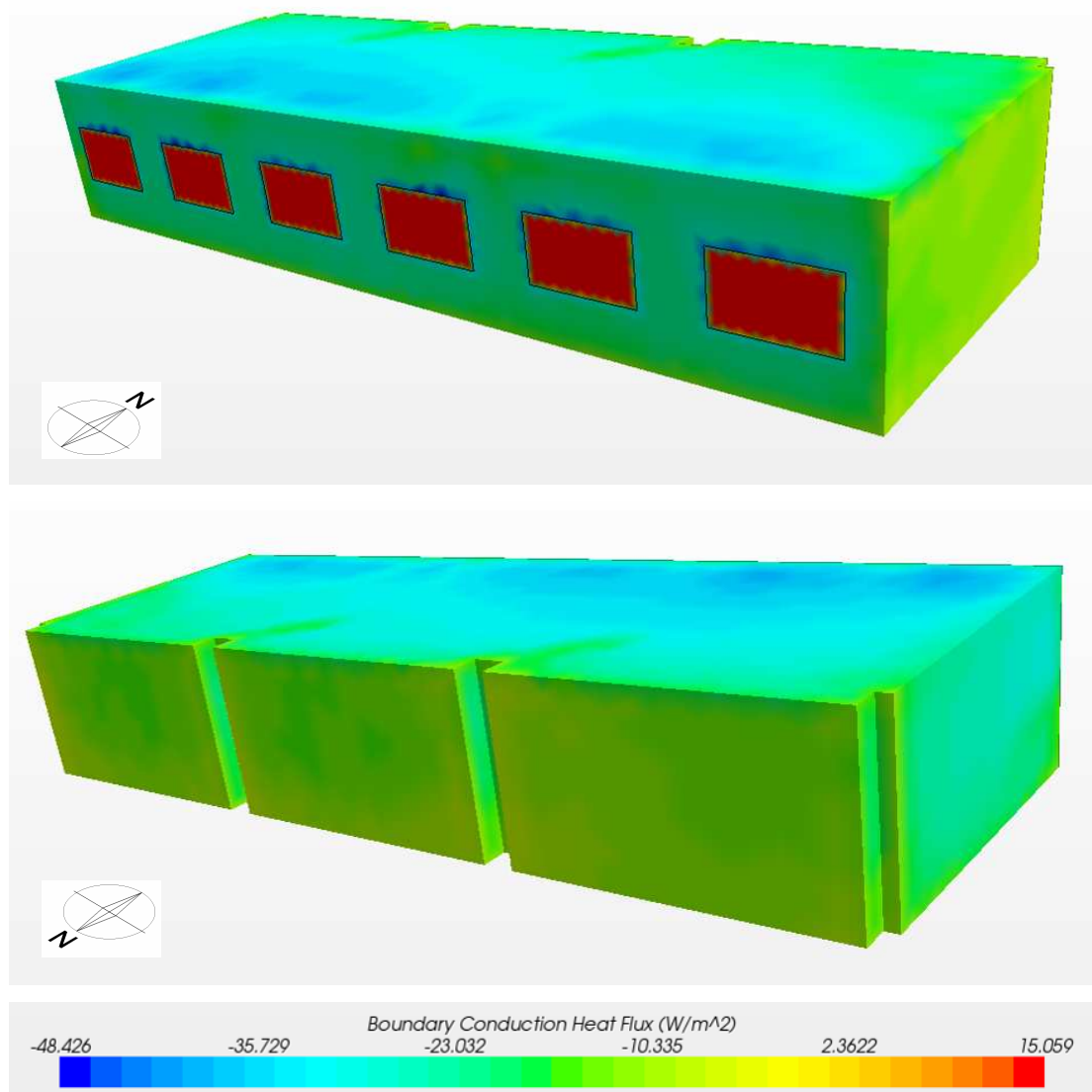
En la figura 88, se muestra la irradiación solar directa en  $\text{W/m}^2$  que desprende el modelo con la fachada principal orientada al sur. Se observan resultados similares a la simulación del modelo con la fachada principal orientada al norte. Las paredes del modelo que más flujo de calor irradian son las que reciben la radiación directa más intensa, solo que en este caso la fachada principal es una de las más afectadas.



*Figura 88. Irradiación solar directa en las paredes y techo del modelo, con la fachada principal orientada al sur*

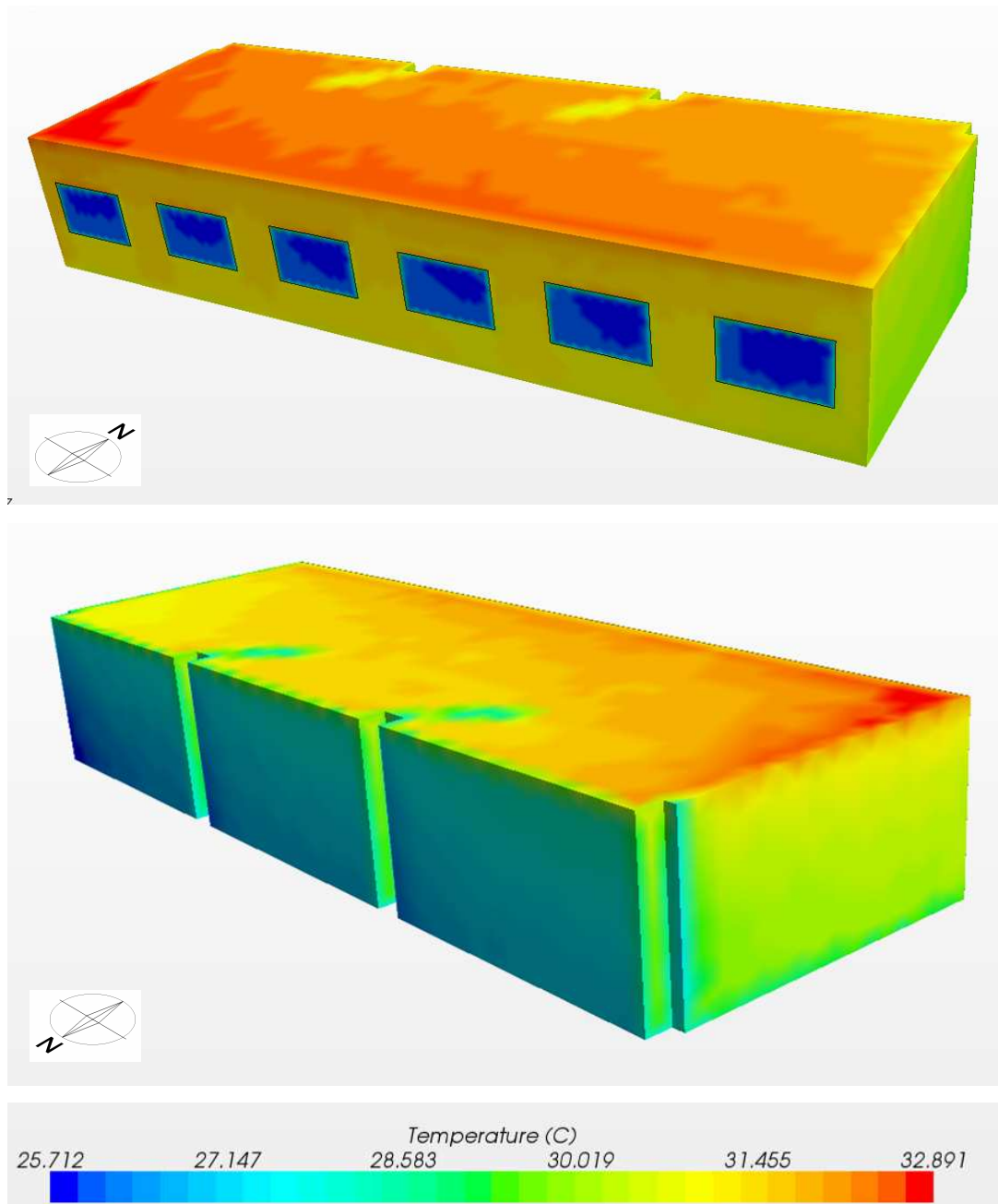


Las figuras 89, muestran el flujo de calor por conducción en las paredes y techo del modelo en  $\text{W/m}^2$ . El signo negativo se debe a la dirección del flujo de calor de las superficies del modelo, es decir, el flujo de calor lleva una dirección hacia el exterior.



*Figura 89. Flujo de calor por conducción en las paredes y techo del modelo, con la fachada principal orientada al sur*

En la figura 90, se muestra la distribución de la temperatura en todas las superficies de la habitación, después del proceso de transferencia de calor en °C.



*Figura 90. Distribucion de temperatura en las paredes y techo del modelo, con la fachada principal orientada al sur*



Los resultados obtenidos con la fachada orientada al sur muestran que las paredes que reciben radiación solar directa experimentan un aumento de temperatura mayor que las que no reciben directamente. También muestra como la diferencia de temperatura entre las ventanas y el cerramiento exterior es mayor si están expuestas a radiación directa, es decir, con la fachada principal orientada al sur.

Comparando las figuras 86-87 y 90, se observa como con la orientación Sur, el aula tendría un aumento de temperatura, que seria un problema en los meses de verano, pero al tratarse de un aula seria un acierto, ya que en este periodo de tiempo no esta en funcionamiento y tendría un gran beneficio en los meses de invierno.



## 7. CONCLUSIONES

El objetivo principal del trabajo era estudiar la viabilidad de un programa de simulación de fluidos para analizar el comportamiento térmico por radiación de una edificación en fase de proyecto, para detectar carencias y así subsanarlas antes de construir. Se ha realizado dos simulaciones de un modelo, con su fachada principal orientada al norte (orientación real) y al sur (orientación ficticia), para comparar el comportamiento térmico por radiación del modelo en ambas orientaciones, y así analizar que orientación hubiera sido la más adecuada.

Las conclusiones más relevantes son:

- 1- Los resultados obtenidos con la orientación real del aula (orientación de la fachada principal al norte), muestran, tal como se esperaba, que la fachada principal no recibe radiación solar directa, aunque si se observa un incremento de temperatura.
- 2- Los resultados obtenidos con la orientación ficticia del aula (orientación de la fachada principal al sur), muestran, tal y como se esperaba, que la fachada principal recibe radiación solar directa, y se observa un incremento mayor de la temperatura respecto a los resultados obtenidos con la orientación real.
- 3- La orientación adecuada para el aula que se ha estudiado, en el caso de haberse realizado este estudio antes de su construcción, habría sido la orientación ficticia. En esta, se observa como la ganancia de calor es mayor en la fachada principal, esta situación sería un problema en los meses de verano, pero al tratarse de un aula sería un acierto, ya que en este periodo de tiempo no está en funcionamiento y tendría un invierno con mayor temperatura en su interior.

4- El proceso de mallado realizado con el programa de simulación virtual permite conocer la distribución, sobre las paredes de la habitación, de los flujos de calor por irradiación solar directa y por conducción-convección. Así mismo permite conocer la distribución de temperatura de las paredes.

5- La variedad que existe actualmente en el mercado de programas de simulación de fluidos, para poder utilizar como herramientas en este campo, tanto en el estudio del comportamiento térmico del edificio, como en el estudio de la ventilación del edificio.

6- Los resultados obtenidos por el programa, muestran la eficiencia del programa en el campo de la edificación. Se trata de una herramienta muy útil para detectar fallos en el proyecto antes de su ejecución, o simplemente para mejorar la eficiencia energética del edificio, introduciendo alguna mejora en el mismo, con un balance final positivo en el campo económico o en el energético.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Blasco Laffón, Emilia; Blasco Laffón, Begoña; Fernández Valdés, José María y Losada González, Juan Carlos; Viñas Arrebola, Carmen. *“Fundamentos Físicos en la edificación II”*. Editorial Delta. ISBN: 978-84-96477-51
- González Díaz M.J. *“Arquitectura sostenible y aprovechamiento solar”*. Neografis, S.L. Impresores. ISBN: 84-86913-11-X.
- Olgyay, Víctor. *“Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas”*. Gustavo Pili, S.A. ISBN: 84-252-1488-2.
- Gonzalo, Guillermo Enrique. *Manual de Arquitectura Bioclimática*. Nobuko. ISBN: 987-1135-07-6.
- González Redondo, Mercedes y Redondo Alvarado, Maria Dolores. *“Teoría analítica de la conducción del calor de Fourier”*. ISBN: 84-9728-102-0.
- González Posada, Francisco; González Redondo, Mercedes y Redondo Alvarado, Maria Dolores. *“Teorías Termológicas – Aplicación a la Arquitectura e Ingeniería”*. ISBN: 483223635
- Yunus A. Çengel. *“Transferencia de Calor”*. Editorial McGraw-Hill. Segunda Edición.
- Colman, J.P. *“Transferencia de calor”*, Editorial Mc Graw Hill, Madrid 1998. ISBN: 84-481-2040-X.
- Espinosa, Susana N. y Masini, Guillermo L. *“Fundamentos de transferencia de calor”*. Mayo 2000



- Saleta Figueroa, Martha Maria; Lorrio Domene, Laura y Viñas Arrebola, Carmen. *“Conocimientos básicos para el manejo y uso de un software de simulación virtual de dinámica de fluidos”*. Madrid 2011
- Martín Monroy, Manuel. *“Tesis Doctoral: Comportamiento térmico de cerramientos soleados. Un modelo de simulación por diferencias finitas”*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Noviembre de 1995.

Páginas webs consultadas:

- <http://www.cleanergysolar.com>
- <http://www.suelosolar.es>
- <http://es.wikipedia.org>
- <http://solete.nichese.com>
- <http://www.flow3d.com>
- <http://www.raczynski.com>
- <http://www.ansys.com>
- <http://www.fisicanet.com>